

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**JOÃO VÍTOR POSSAMAI DE MENEZES**

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS: UM MÉTODO HÍBRIDO  
COMBINANDO OS MÉTODOS DO TRAÇADO DE RAIOS E DAS  
FONTES VIRTUAIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2018**

**JOÃO VÍTOR POSSAMAI DE MENEZES**

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS: UM MÉTODO HÍBRIDO  
COMBINANDO OS MÉTODOS DO TRAÇADO DE RAIOS E DAS  
FONTES VIRTUAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Rosa

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes

**CURITIBA**

**2018**

JOÃO VÍTOR POSSAMAI DE MENEZES

## Caracterização Acústica de Salas: um método híbrido combinando os métodos do traçado de raios e fontes virtuais

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 15 de junho de 2018.

---

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### *ORIENTAÇÃO*

### *BANCA EXAMINADORA*

---

Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Marcio Henrique de Avelar Gomes, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Coorientador

---

Marcio Henrique de Avelar Gomes, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Antonio Carlos Pinho, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Glauber Gomes de Oliveira Brante, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço sinceramente a meus pais, Karina e José Vitor, a meu irmão Leonardo José e aos demais membros da família que de alguma maneira contribuíram para minha jornada na feitura desse trabalho.

À minha namorada, Karoline, agradeço também sinceramente pela paciência e pelo carinho com os quais me ajudou nos pontos cruciais do trabalho.

A meus dois orientadores, Marcelo e Marcio, também agradeço pelo compartilhamento do saber e pela honra de ter desenvolvido um trabalho sob suas orientações.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná deixo também meus sinceros agradecimentos. Foi aqui que comecei uma jornada em 2008 no curso técnico integrado em Gestão de Pequenas e Médias Empresas e é com esse trabalho que concluo, por ora, esse percurso, com o título de Engenheiro Eletricista.

## RESUMO

MENEZES, João Vítor Possamai de. **Caracterização Acústica de Salas: um método híbrido combinando os métodos do traçado de raios e fontes virtuais**. 2018. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

Para a simulação de respostas ao impulso de salas, são especialmente bem-sucedidos os métodos que usam os princípios da acústica geométrica. Para comprimentos de onda pequenos em relação às dimensões da sala, tais métodos facilitam a obtenção de estimativas da Resposta ao Impulso, já que as ondas sonoras são modeladas como raios, eliminando a necessidade de resolução da equação da onda. Dada sua relevância, este trabalho apresenta uma implementação do método híbrido proposto por Michael Vorländer em 1989 que combina o método do Traçado de Raios e o método das Fontes Virtuais. Esse método aprimorado combina a rapidez do Traçado de Raios com a precisão das Fontes Virtuais. Primeiramente, propõe-se uma versão desse método híbrido implementada em linguagem MATLAB usando suas capacidades de execução paralela. Outros benefícios esperados com o desenvolvimento nesse ambiente são a facilidade de divulgação, por meio de pacote de scripts, e de uso em disciplinas de graduação e pós-graduação na área de acústica e processamento de sinais. Em seguida, sua performance é analisada comparando-se as respostas ao impulso medidas com respostas obtidas analiticamente através de parâmetros acústicas e do Erro Médio Quadrático (MSE) entre tais respostas. Foram também analisados os impactos da implementação de fonte sonora não uniforme e de reflexões difusas. Obtiveram-se resultados não inteiramente conclusivos, mas que indicaram caminhos para continuidade da pesquisa. Novos estudos com concentrações de raios mais compactas na fonte sonora e também com mais variações de implementação de reflexões difusas incorporando o coeficiente de difusão das superfícies são próximos passos a serem dados.

**Palavras-chave:** Acústica geométrica, MATLAB, Traçado de Raios, Fontes Virtuais.

## ABSTRACT

MENEZES, João Vítor Possamai de. **Acoustical Characterization of Rooms: a hybrid method combining the Raytracing and the Image Sources methods.** 2018. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

For the simulation of Room Impulse Responses (RIRs) are specially well succeeded methods built within the geometrical acoustics principles. For wave lengths which are small in relation to the room dimensions, such methods facilitate the obtainment of RIR estimates, since the sound waves are modelled as rays, eliminating the need for a wave equation-based solution. Given the relevance of such methods, this paper presents an implementation of the hybrid method proposed by Michael Vorländer in 1989, which combines the Ray tracing and the Image sources methods. This improved method combines the speed of the Ray tracing with the precision of the Image sources. Initially is proposed a version of this hybrid method, which is implemented in MATLAB using its parallel processing capacities. Other benefits of the development of the method in MATLAB are expected, such as the ease of disclosure through packages of scripts and its application in signal processing and acoustics undergraduate and graduate classes. Then the method's performance was analyzed through the comparison of simulated and analytically obtained RIRs using acoustical parameters and MSE. Were also analyzed the impacts of the implementation of non-uniform sound source and diffuse reflections. The results were not absolutely conclusive, but they show promising paths for further research. New studies using more concentrated non-uniformities on the sound source and more variations of the diffuse reflections applying the diffusion coefficient of surfaces are next steps to be taken.

**Keywords:** Geometrical acoustics, MATLAB, Ray Tracing, Image Sources.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração do método do traçado de raios.....	17
Figura 2 - Ilustração do princípio do método das fontes virtuais.....	18
Figura 3 - Tempo computacional em horas num computador pessoal para um caso particular em função do tamanho da resposta ao impulso.....	19
Figura 4 - Fluxograma da representação numérica das reflexões múltiplas de um único raio.....	25
Figura 5 - Os métodos determinístico (a) e estatístico (b) para a obtenção das direções dos vetores uniformemente distribuídos ao redor da fonte .....	26
Figura 6 - Uma fonte onidirecional obtida pela subdivisão geodésica da esfera.....	27
Figura 7 - Seção transversal de uma sala convexa.....	28
Figura 8 - Reflexão do raio determinado pelo ponto $P_s$ e pelo vetor $v$ pelo plano determinado pelo ponto $Q$ e pelo vetor $N_r$ .....	29
Figura 9 - Funções resposta ao impulso medidas experimentalmente e calculada pelo algoritmo do traçado de raios com receptor modelado como disco circular.....	30
Figura 10 - Arranjo espacial em duas dimensões das fontes virtuais .....	31
Figura 11 - Árvore de fontes virtuais.....	32
Figura 12 - Exemplo de uma sala estudada pelo método das Fontes Virtuais.....	33
Figura 13 - Fluxograma básico do método das Fontes Virtuais.....	34
Figura 14 – Esquema de correlação entre os raios do método do Traçado de Raios e as fontes do método das Fontes Virtuais.....	36
Figura 15 – Fluxograma do algoritmo híbrido combinando os métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais.....	36
Figura 16 – Resposta ao Impulso obtida analiticamente.....	41
Figura 17 – Curva de Decaimento da Resposta ao Impulso obtida analiticamente.....	41
Figura 18 - Fonte sonora gerada por função desenvolvida em MATLAB com 15 divisões em cada aresta de cada face do icosaedro.....	43
Figura 19 - Comportamento da fonte sonora gerada por função no MATLAB.....	43

Figura 20 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios.....	44
Figura 21 – Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios.....	45
Figura 22 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.....	46
Figura 23 – Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.....	46
Figura 24 – Análise em cada instante de tempo do MSE entre a Resposta ao Impulso obtida pelo método do Traçado de Raios e a obtida analiticamente.....	48
Figura 25 – Análise em cada instante de tempo do MSE entre a Resposta ao Impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais Híbrido e a obtida analiticamente.....	48
Figura 26 - Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente, pelo método do Traçado de Raios e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.....	49
Figura 27 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora não uniforme na direção $\vec{v}_1$ .....	51
Figura 28 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora uniforme e fonte sonora não uniforme na direção $\vec{v}_1$ .....	51
Figura 29 – Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora uniforme e fonte sonora não uniforme na direção $\vec{v}_1$ .....	52
Figura 30 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora não uniforme nas direções $\vec{v}_1$ e $\vec{v}_2$ .....	52
Figura 31 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora não uniforme nas direções $\vec{v}_1$ e $\vec{v}_2$ .....	53
Figura 32 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com fonte sonora não uniforme na direção $\vec{v}_1$ .....	54



Figura 33 - Ilustração do funcionamento do modelo de reflexões difusas implementado.....	55
Figura 34 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.....	56
Figura 35 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com reflexões difusas.....	56
Figura 36 – Comparação as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com e sem reflexões difusas.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros acústicos relativos à Resposta ao Impulso obtida analiticamente.....	42
Tabela 2 – Parâmetros acústicos e MSE relativos à Resposta ao Impulso obtida analiticamente e à Resposta ao Impulso obtida pelo método do Traçado de Raios.....	45
Tabela 3 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente, pelo método do Traçado de Raios e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.....	47
Tabela 4 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios com fontes uniforme e não uniforme.....	53
Tabela 5 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com fontes uniforme e não uniforme.....	54
Tabela 6 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com e sem reflexões difusas.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASA	Sociedade Acústica da América
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior
D50	Parâmetro acústico: Definição
EDT	Parâmetro acústico: Tempo de decaimento inicial
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IEEE	Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LTI	Característica de sistemas: Linear e invariante no tempo
MATLAB	Software desenvolvido pela Mathworks
MSE	Parâmetro estatístico: Erro médio quadrático
RIR	Resposta ao Impulso de uma sala
T20	Parâmetro acústico: Tempo de reverberação
UNICAMP	Universidade de Campinas
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1. TEMA.....	14
1.1.1. Delimitação do Tema.....	14
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS.....	14
1.3. OBJETIVO.....	20
1.3.1. Objetivo Geral.....	20
1.3.2. Objetivos Específicos.....	20
1.4. JUSTIFICATIVA.....	20
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
<b>2. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA GERAL E GEOMÉTRICA</b> .....	24
2.1. O MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS.....	24
2.2. O MÉTODO DAS FONTES VIRTUAIS.....	30
<b>3. O MÉTODO HÍBRIDO ENTRE O TRAÇADO DE RAIOS E AS FONTES VIRTUAIS</b> .....	35
<b>4. RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS DE ACÚSTICA GEOMÉTRICA</b> .....	38
4.1. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	38
4.1.1. Tempo de Decaimento Inicial (EDT).....	38
4.1.2. Tempo de Reverberação (T20).....	38
4.1.3. Definição (D50).....	39
4.1.4. Erro Médio Quadrático (MSE).....	39
4.1.5. Curva de Decaimento.....	39
4.2. AMBIENTE SIMULADO.....	40
4.3. OBTENÇÃO DA RESPOSTA AO IMPULSO ANALÍTICA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	40
4.4. RESULTADO GERAIS.....	40
4.4.1. Resposta ao Impulso obtida analiticamente.....	40

4.4.2. Método do Traçado de Raios.....	42
4.4.3. Método das Fontes Virtuais Híbrido.....	46
4.5. RESULTADOS COM DIFERENTES MODELOS.....	50
4.5.1. Variação da uniformidade da fonte sonora.....	50
4.5.2. Reflexões difusas.....	55
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
REFERÊNCIAS.....	60

## 1. INTRODUÇÃO

A acústica de ambientes trata da otimização da transmissão da fala e da música em salas e ao ar livre. A uniformidade da intensidade sonora e o fornecimento direto do som, com primazia das reflexões iniciais, são fatores que contribuem para a percepção do comportamento acústico de um ambiente. Para modificar esses fatores, uma das soluções é realizar o planejamento estrutural do ambiente para que a inclinação das ondas sonoras seja adequada àquilo que se conhece como o ideal, até o momento. Por outro lado, para um bom planejamento acústico o eco e as concentrações sonoras devem ser minimizados [1].

Estudos do comportamento acústico de ambientes acontecem desde o auge da civilização grega antiga. Em teatros gregos e romanos buscava-se uma configuração física que propiciasse aos espectadores melhor entendimento do que era apresentado, como peças teatrais e discursos. Nessa época, as estruturas não possuíam cobertura, ou seja, não eram fechadas. A partir do século XVI é que os primeiros ambientes acústicos totalmente fechados começaram a ser construídos, principalmente na Itália e na Alemanha. O foco então passou a ser as óperas e os concertos [1]. Hoje são realizados estudos acústicos em vários ambientes, como hospitais, salas de aulas, aeroportos, salas de testes e escritórios, além das salas de concerto e dos teatros, que têm a acústica como uma das suas principais características.

De acordo com a teoria de sinais e sistemas, pode-se modelar o ambiente estudado como um sistema, o som produzido lá como sua entrada e o som que é percebido como sua saída. Assim, pode-se analisar acusticamente um ambiente por meio do processamento de sinais, determinando sua Resposta ao Impulso (também chamada de Resposta Característica), no domínio do tempo, ou sua Função de Transferência, no domínio da frequência [1].

Os modos de caracterização acústica abordados nesse trabalho serão os métodos computacionais baseados na acústica geométrica, que presume uma série de simplificações na propagação do som para facilitar a determinação da resposta ao impulso e da função de transferência [2].

## 1.1. TEMA

Caracterização acústica de salas.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Caracterização acústica de ambientes com três dimensões e de geometria pré-definida por meio de um método híbrido que envolve o método das Fontes Virtuais e o do Traçado de Raios.

## 1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Um modo de caracterização do comportamento acústico de um ambiente fechado é a determinação de sua Resposta ao Impulso, que pode ser descrita como uma função. Uma definição de Resposta ao Impulso é a de uma função que registra a pressão sonora ao longo do tempo em um ambiente fechado após uma excitação extremamente curta e cheia de energia (um estrondo, por exemplo) [1]. O equacionamento matemático para o comportamento de um ambiente fechado pode ser dado pela convolução a seguir:

$$y_s(t) = g(t) * x_e(t) \quad (1)$$

Nesse caso,  $y_s(t)$  é o sinal de saída,  $x_e(t)$  é o sinal de entrada e  $g(t)$  é uma função característica de cada ambiente que altera o sinal de entrada segundo suas propriedades físicas.

Para se calcular a Resposta ao Impulso, é utilizado como modelo desse impulso a função delta de Dirac  $\delta(t)$ . Essa função, segundo [3], é definida pelas equações 2 e 3:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \forall t \neq 0 \\ \text{indefinida} & \text{para } t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (3)$$

Deste modo, para manter sua área unitária, o delta de Dirac, que só existe em um ponto (na origem, caso não seja deslocado), deve tender ao infinito, o que explica sua indeterminação quando  $t = 0$ . Matematicamente, utiliza-se o delta de Dirac descrito pelas equações 2 e 3. Na prática, o que se obtém é uma aproximação desse delta com duração não nula. Uma propriedade importante do delta de Dirac no estudo do domínio da frequência é que sua transformada de Fourier contém todo o espectro de frequências, enquanto que no tempo apenas um ponto possui valores não nulos. Isso é uma amostra da dualidade que os domínios do tempo e da frequência apresentam: quanto mais amplo um sinal é em um dos domínios, mais estreito ele será no outro.

Em um sistema LTI, a resposta ao impulso é definida como a saída desse sistema quando um impulso de Dirac  $\delta(t)$  é aplicado na entrada [4]. Considerando um ambiente fechado como um sistema, seu comportamento pode ser equacionado como:

$$y_s(t) = g(t) * \delta(t) \quad (4)$$

Por meio das propriedades da convolução da função  $\delta(t)$ , tem-se o seguinte resultado:

$$y_s(t) = g(t) \quad (5)$$

Ou seja, a resposta ao impulso (a saída) é obtida quando um ambiente (o sistema) sofre excitação de um impulso (a entrada). Por exemplo, quando se está numa sala de aula e uma pessoa bate as mãos uma única vez, o som que se ouve é uma aproximação da resposta ao impulso da sala.

A Resposta ao Impulso pode ser medida por meio de excitações sonoras no ambiente na forma de impulso, ou trem de impulsos, ou por meio de técnicas mais robustas que excitam o ambiente com sinais de banda larga de frequência como varredura de senos ou sinais aleatórios ou pseudoaleatórios [4].

Além disso, a Resposta ao Impulso pode ser obtida por meio da solução da equação da onda ou por meio da análise estatística da propagação da energia. A solução da equação da onda é complexa e pode ser feita analiticamente apenas para casos específicos ou feita por meio de métodos numéricos, como o Método dos



Elementos Finitos ou o Método dos Elementos de Contorno. Devido, entretanto, à complexidade dessa análise numérica para salas muito grandes e frequências muito altas, o tempo de processamento computacional inviabiliza esse tipo de solução [4].

Atualmente os programas, comerciais ou não, mais utilizados para a caracterização do comportamento acústico de ambientes fazem uma boa aproximação para a maioria dos casos se utilizando da análise estatística da propagação da energia, que se baseia na acústica geométrica. A condição principal para essa análise geométrica é que a propagação do som se dá por meio de raios, e não por meio de ondas, como realmente acontece. Essa é uma aproximação válida para frequências médias e altas, nas quais o comprimento de onda do som é pequeno em comparação às dimensões dos ambientes [2]. Para isso, os métodos mais utilizados são o do Traçado de Raios [6], o das Fontes Virtuais [7], o de Traçado de Cones ou Pirâmides [8], o da Transição de Energia [9] e o da Radiosidade [10]. Além disso, há os métodos híbridos, que combinam alguns dos métodos anteriores [11], [12].

Este trabalho tem como foco os métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais. A partir de algoritmos que implementam esses dois métodos na linguagem C, foi desenvolvido um método híbrido na linguagem MATLAB.

Cada um dos métodos em análise possui características específicas. O método do Traçado de Raios parte de uma fonte sonora que emite o som em várias direções, sendo que cada onda sonora é modelada como uma partícula. Para um ponto receptor específico, esse método traça o caminho percorrido por cada partícula, salvando informações relevantes sempre que ela encontra o receptor. A direção de colisão da partícula com o receptor, a energia com a qual essa partícula atinge o receptor e o tempo em que cada colisão acontece são exemplos de informações relevantes que devem ser acumuladas durante o processamento do método. A cada reflexão, a partícula perde energia devido ao contato com a parede, o que determina o critério de parada do algoritmo. Ele é definido por uma energia mínima, com a qual a partícula já pode ser desprezada e outra iteração para outra direção já pode ser realizada.

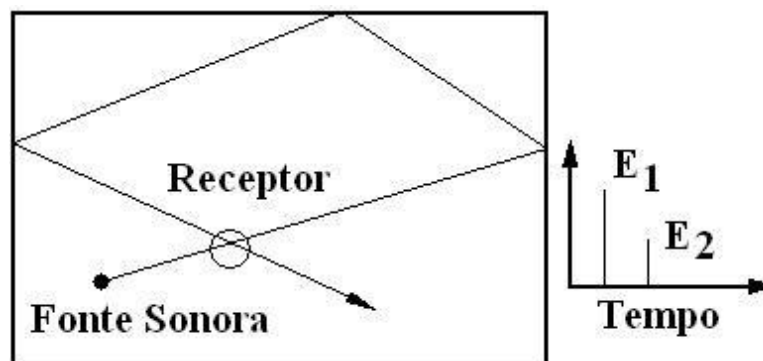
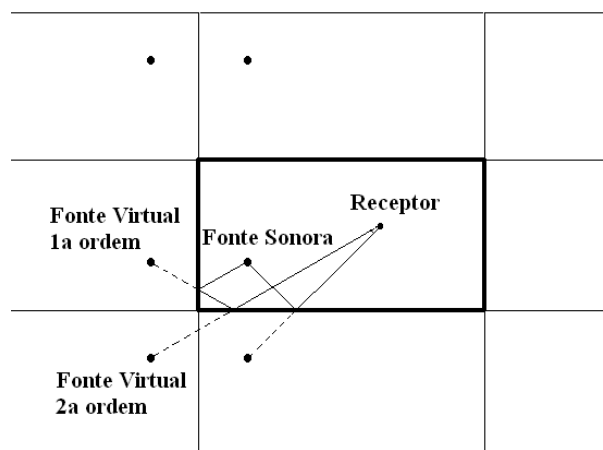


Figura 1 – Ilustração do método do Traçado de Raios [5]

A figura 1 exemplifica o início da trajetória de uma partícula. Ela colidiu com o receptor duas vezes ( $E_1$  e  $E_2$ ), mas com energias diferentes e em instantes de tempo diferentes. Em  $E_2$  a energia é menor que em  $E_1$ , pois houve perdas devido às reflexões nas paredes.

O método das Fontes Virtuais, segundo [5], pode ser descrito por meio de uma analogia óptica na qual todas as paredes do ambiente fechado são espelhos. Em um “ambiente fechado com paredes planas e reflexão especular, pode-se traçar raios de um ponto receptor até a fonte sonora.” [11]. Com isso, determinam-se fontes virtuais de ordem  $n$ , sendo  $n$  o número de reflexões que o raio que a gerou sofreu. Cada fonte virtual deve ser refletida em relação a todas as paredes para que se forme uma malha de fontes virtuais que serão usadas para o cálculo da resposta ao impulso do ambiente fechado. Contudo, segundo [5], não são todas as fontes virtuais que podem ser utilizadas para esse cálculo. Para que sejam úteis, elas devem obedecer aos critérios de validade, proximidade e visibilidade.

Uma fonte é válida somente quando ela não foi gerada por uma reflexão da mesma superfície da qual ela se origina. Além disso, uma fonte virtual também só é utilizada no cálculo da resposta ao impulso do ambiente quando ela está suficientemente próxima do receptor. Definida essa distância, fontes mais afastadas do que esse limite devem ser desprezadas, sendo esse um critério de parada para o algoritmo. Finalmente, a fonte virtual deve ser “visível” pelo receptor para ser considerada no cálculo da resposta ao impulso. Para que seja verificado o critério de visibilidade é necessário um teste computacionalmente custoso. Exemplificando, para uma fonte virtual de primeira ordem, o critério de visibilidade é satisfeito se a linha que a liga ao receptor cruza o plano que a gerou. Para fontes de ordens superiores, o teste é mais complexo.



**Figura 2 – Ilustração do princípio do método das Fontes Virtuais [5].**

A figura 2 exemplifica a determinação de fontes virtuais de primeira e segunda ordem num ambiente fechado de paredes planas e reflexão especular. A partir da primeira reflexão do raio partindo da fonte sonora, gerou-se a fonte virtual de primeira ordem. A partir da segunda reflexão do raio partindo da fonte sonora, gerou-se a fonte virtual de segunda ordem.

Segundo [11], o método das Fontes Virtuais é mais preciso que o método do Traçado de Raios, pois as energias e os tempos de chegada dos raios são obtidos com precisão de variáveis de ponto flutuante, sendo possível calcular a transformada de Fourier para analisar a acústica do ambiente no domínio da frequência. Por outro lado, a resolução temporal obtida pelo método do Traçado de Raios é limitada.

Com isso, a função de Resposta ao Impulso calculada pelo método das Fontes Virtuais é truncada logo em seu trecho inicial, pois, ainda segundo [6], o tempo computacional requerido aumenta exponencialmente com a extensão temporal da função calculada. Para o método do Traçado de Raios, o tempo computacional aumenta proporcionalmente à extensão temporal da função calculada. Sendo assim, para os primeiros instantes da função de Resposta ao Impulso é utilizado o método das Fontes Virtuais enquanto que para o restante da função é empregado o método do Traçado de Raios.

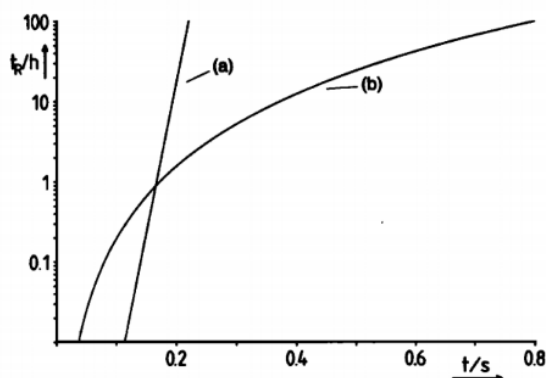
Com isso, exemplifica-se um problema na obtenção de funções Resposta ao Impulso de ambientes fechados: o tempo de processamento computacional do método mais preciso, que é o das Fontes Virtuais, que depende principalmente da ordem máxima desejada das fontes. A expressão que calcula o tempo de processamento computacional, segundo [11], é a seguinte:

$$t_{PC} = \frac{n_{\omega}}{n_{\omega}-2} [(n_{\omega} - 1)^i - 1] \quad (6)$$

sendo  $n_{\omega}$  é o número de paredes do ambiente e  $i$  a ordem máxima desejada das fontes virtuais.

É possível, contudo, diminuir esse tempo computacional com o auxílio do método do Traçado de Raios. Como grande parte do tempo de processamento computacional do método das Fontes Virtuais é devido aos testes de validade, proximidade e visibilidade das fontes, um método de simplificar esses testes é de grande valia. E com o Traçado de Raios é possível pré-selecionar fontes virtuais audíveis para acelerar a simulação feita através do método das Fontes Virtuais. Essa seleção se dá por meio da análise da história das partículas que passaram pelo método do Traçado de Raios [5].

Segundo [11], o tempo computacional desse método híbrido seria sensivelmente reduzido, como exemplificado na figura 3:



**Figura 3 – Tempo computacional em horas num computador pessoal para um caso particular em função do tamanho da resposta ao impulso. a) Método das Fontes Virtuais convencional. b) Novo algoritmo híbrido [11].**

É produtivo então analisar os dois métodos expostos para que um método híbrido mais eficiente seja construído.

### 1.3. OBJETIVO

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo elaborar um programa para determinação da função de resposta ao impulso de salas baseado nos métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudar os métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais;
- Estudar os programas disponíveis que implementam os métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais;
- Elaborar um programa usando um método híbrido combinando os métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais em linguagem MATLAB;
- Realizar testes de precisão do programa elaborado em salas padrão em comparação com outros métodos de obtenção da resposta ao impulso;
- Implementar modelos de fontes não uniformes e de reflexões difusas nos métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais Híbrido e analisar seu impacto nos resultados.

### 1.4. JUSTIFICATIVA

O comportamento acústico dos ambientes de convivência da sociedade é um fator de grande impacto na relação que as pessoas criam com esses espaços. Salas de aula e auditórios devem proporcionar um entendimento claro do que está sendo falado, o que significa pouca reverberação sonora e distribuição uniforme do som, principalmente nas frequências da fala humana, que variam de cerca de 100Hz a 5kHz [1]. Por outro lado, templos religiosos, a fim de causar um impacto maior com o que está sendo falado, são geralmente projetados para causar muita reverberação, o que prejudica a inteligibilidade da fala. A percepção humana extrai significado e

sensações dos parâmetros acústicos, como o de conforto em salas de aula ou o de grandiosidade em templos religiosos.

Esse tipo de relação pode ser caracterizado com uma relação psicoacústica, pois analisa o efeito de acontecimentos físicos na percepção auditiva humana. Para que um ambiente cause o impacto desejado em quem o frequenta, é realizado seu planejamento acústico ou eletroacústico. Para cada tipo de ambiente são levados em conta fatores específicos, como exemplificado em [1], onde são feitas considerações sobre o planejamento acústico e eletroacústico de salas de concerto, igrejas, cinemas, escolas, ginásios esportivos e estúdios de produção musical. Como os parâmetros acústicos são afetados principalmente por características construtivas dos ambientes, como suas dimensões e formas, é indicado fazer um planejamento acústico já em sua concepção, pois para alterar esses parâmetros por meio de reformas após o ambiente já estar construído é muito mais dispendioso.

O cerne do planejamento acústico é definir como um ambiente vai responder aos sons que neles são produzidos para então estudar qual a percepção auditiva que isso vai acarretar aos usuários do ambiente. Para isso a Resposta ao Impulso desse ambiente é fundamental, pois é uma espécie de “impressão digital” que caracteriza como os sons se comportam dentro dele. Durante a fase de planejamento, várias configurações são testadas para o ambiente, e a forma de testar o comportamento do ambiente é simulando sua Resposta ao Impulso. Para isso, métodos precisos e rápidos para esse teste são essenciais na concepção de ambientes acusticamente planejados.

Para desenvolver um algoritmo próprio e estudar os métodos nos quais ele se baseia é que este trabalho se faz importante. Com a hibridização dos métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais, um algoritmo teoricamente mais preciso e rápido computacionalmente foi construído.

Outros empregos da Resposta ao Impulso de ambientes existem e são variados. Em aplicações de processamento de fala, como seu reconhecimento e tratamento contra reverberação e ruídos, a Resposta ao Impulso se faz muito importante para a estimativa de parâmetros de reverberação que auxiliam na caracterização do som capturado por microfones em ambientes anecoicos para processamento [13].

A Resposta ao Impulso também é importante para aplicações de Realidade Virtual, que são “ambientes gerados no computador com os quais o usuário pode

operar e interagir em tempo real” [14]. Para *renderizar* ambientes de Realidade Virtual, ou seja, gerar a ambientação em três dimensões para imagem e áudio, por exemplo, é necessária a Resposta ao Impulso para simular a acústica do ambiente gerado.

Para testar a percepção psicoacústica de pessoas em relação a ambientes é utilizada a resposta ao impulso para que a pessoa se sinta dentro do ambiente. Isso ocorre por meio do processo de auralização: o primeiro passo é transformar a resposta ao impulso resultante de uma simulação computacional em um sinal de dois canais que simule a audição dos ouvidos direito e esquerdo, levando em conta as diferenças causadas pela incidência de som na cabeça do ouvinte [5]. Assim podem ser construídas amostras sonoras para testes psicoacústicos.

Este trabalho também deixa como resultado para a instituição UTFPR o algoritmo em MATLAB construído para que futuros trabalhos de pesquisa possam se aproveitar dele em pesquisas complementares na área de Acústica. Além disso, caso surjam disciplinas de graduação ou pós-graduação na área de Acústica, haverá disponibilidade de um programa desenvolvido na própria UTFPR para determinação de Resposta ao Impulso ao invés de se criar a necessidade da aquisição de licenças de programas comerciais para esse fim.

## 1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A primeira etapa do trabalho consistiu na revisão bibliográfica em várias bases de artigos científicos, como a do IEEE, a da ASA e da CAPES. Além disso, artigos científicos e materiais de teoria já em posse do orientando e dos orientadores foram consultados, bem como referências que foram citadas nesses trabalhos e que sejam de interesse para o trabalho. Essa etapa teve como principal resultado um banco de referências bibliográficas que foi consultado durante todo o andamento do trabalho.

Como primeiro passo prático do trabalho foram estudados dois programas em linguagem C desenvolvidos no âmbito do projeto "Desenvolvimento de programa para simulação da acústica de salas", de autoria do coorientador Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes, financiado pela FAPESP, desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP que determinam a Resposta ao Impulso por meio do método do Traçado de Raios e do método das

Fontes Virtuais. Após isso, foi estudado o método híbrido entre o Traçado de Raios e as Fontes Virtuais para que, em linguagem MATLAB, fosse construído um programa híbrido com base nos dois programas previamente estudados. O resultado do programa construído foi comparado com o resultado obtido analiticamente. Após isso, foi investigado o impacto de dois modelos nos resultados do método implementado: o modelo em que a fonte sonora não é uniforme e o modelo em que há reflexões difusas.

## 1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é composto por 5 capítulos nomeados da seguinte maneira: Introdução; Fundamentos de acústica geral e geométrica; O método híbrido entre o traçado de raios e as fontes virtuais; Resultados da implementação computacional dos métodos de acústica geométrica; e Conclusões.

O primeiro capítulo é introdutório. Apresenta a fundamentação teórica de modo básico, traça os caminhos a serem percorridos ao longo do trabalho e justifica sua importância científica.

O segundo capítulo trata profundamente da fundamentação teórica da acústica de ambientes, expondo conceitos importantes gerais e mais específicos, da acústica geométrica. Além disso, expõe a lógica e as particularidades dos métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais.

O terceiro capítulo é sobre o método híbrido que combina os dois métodos explicados no segundo capítulo. É abordado o modo por meio do qual esses dois métodos se combinam, formando um mais eficiente.

O quarto capítulo traz os resultados obtidos tanto analiticamente quanto por meio dos métodos implementados, o do Traçado de Raios e o das Fontes Virtuais Híbrido. Também são analisados os resultados da implementação do modelo de fonte sonora não uniforme e de reflexões difusas.

O quinto capítulo conclui o trabalho, com observações acerca dos resultados obtidos e enumera possibilidades para trabalhos futuros.



## 2. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA GERAL E GEOMÉTRICA

### 2.1. O MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS

O método do Traçado de Raios é um método que se utiliza da acústica geométrica para simular a resposta ao impulso de salas. Modelando as ondas sonoras como raios, o estudo de sua propagação é simplificado, possibilitando seu desenvolvimento por meio de conceitos da geometria analítica.

O método consiste em mapear (traçar) dentro da sala as trajetórias percorridas por todos os raios emitidos pela fonte sonora. Os raios são acompanhados até possuírem uma quantidade de energia desprezível e perdem energia ao serem refletidos por uma parede e pelo contato com o ar. Ao se iniciar o Traçado de Raios, define-se um receptor, para o qual a resposta ao impulso será simulada. Caso durante sua trajetória um raio atinja o receptor, são gravadas as seguintes informações, que construirão a função resposta ao impulso:

- Energia com a qual o raio atingiu o receptor;
- Tempo que o raio levou para atingir o receptor;
- Direção com que o raio atingiu o receptor;

Tem-se, assim, um conjunto de duplas tempo-energia com o qual é possível construir um histograma para representar a distribuição temporal da energia que atingiu o receptor. Essa distribuição é a função Resposta ao Impulso da sala para o receptor considerado.

Para caracterizar uma sala acusticamente por meio desse método, faz-se necessário auxílio computacional. Para isso, deve-se dividir o método em etapas a serem executadas consecutivamente dentro de um algoritmo computacional. Segundo [6], a figura 4 é uma representação algorítmica do traçado de um raio dentro do método do Traçado de Raios, mostrando todos os testes e operações a serem feitos durante o mapeamento da trajetória de um raio. O método completo, naturalmente, consiste no mapeamento da trajetória de todos os raios, sendo assim o fluxograma da figura 4 muito útil para a compreensão do algoritmo como um todo.

No fluxograma da figura 4 são utilizadas as seguintes variáveis:

- $E_0$ : energia inicial do raio;

- $MAX$ : o maior número real que pode ser armazenado na memória do computador;
- $PEN_i$ : variável lógica que indica se o  $i$ ésimo setor penetra a sala;
- $\alpha_r$ : o coeficiente de absorção de cada setor pelo qual o raio é refletido.

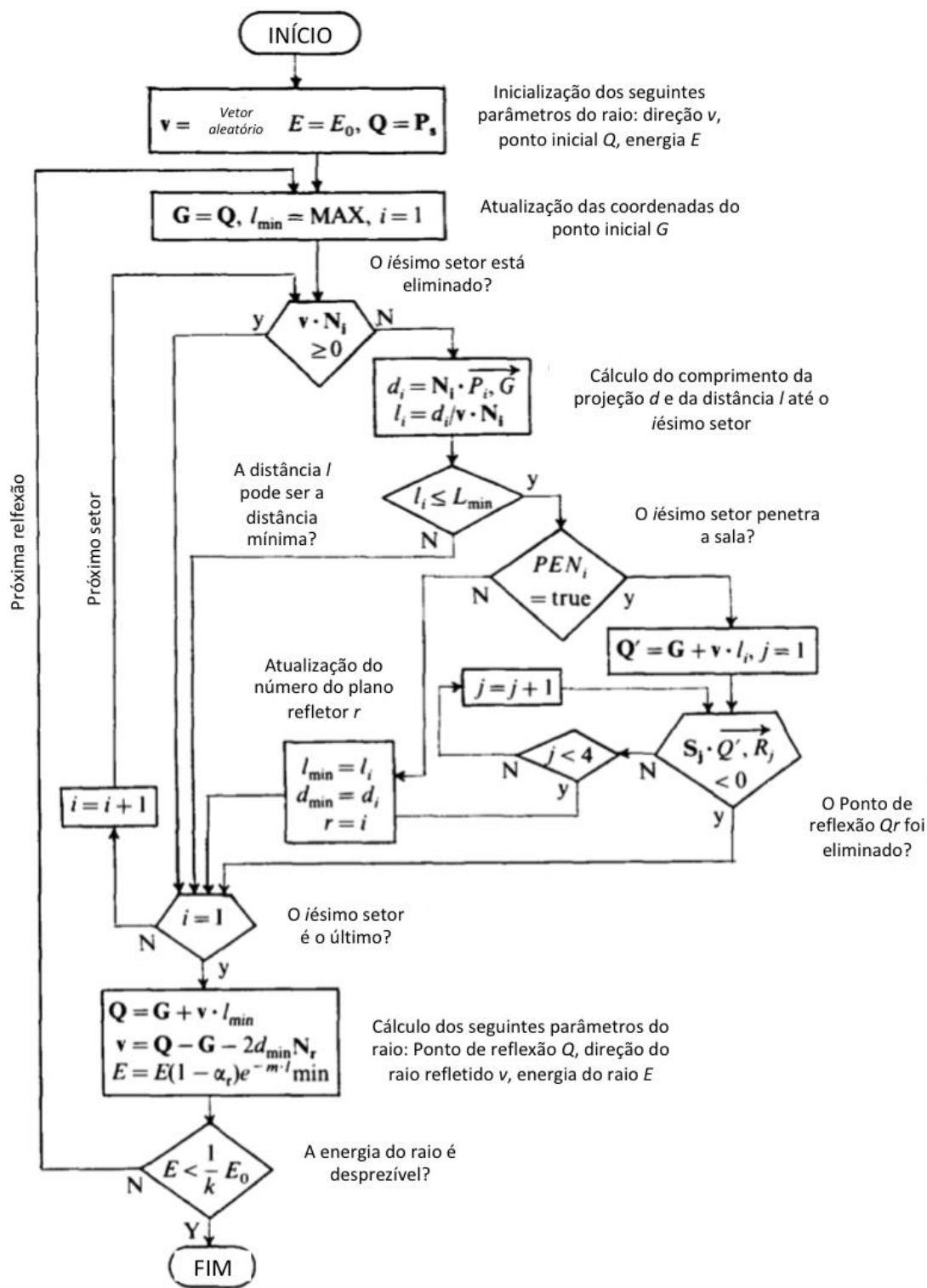


Figura 4 – Fluxograma da representação numérica das reflexões múltiplas de um único raio. Adaptado de [6]

Contudo, antes do início do algoritmo devem ser caracterizadas a sala, a fonte sonora e o receptor. Para a caracterização da sala, aproximada por diversos setores retangulares, é necessário descrever geometricamente cada um dos planos que a compõem por meio de um par de tríades:

- Ponto: as três coordenadas cartesianas de um ponto pertencente ao plano;
- Normal: as três componentes do vetor normal ao plano.

A fonte sonora pode ser modelada por alguns métodos. Independente da modelagem escolhida, o importante é que partam raios do centro da fonte uniformemente em todas direções. Alguns métodos descritos para a modelagem da fonte sonora são o determinístico, o estatístico [6] e o que consiste na subdivisão geodésica de uma esfera [15].

O método determinístico distribui pontos de modo geometricamente regular ao longo da superfície da esfera (figura 5a) enquanto que o método estatístico distribui esses pontos aleatoriamente (figura 5b). Unindo-se tais pontos com o centro da esfera, determina-se os raios que a fonte sonora emite.

Por outro lado, a modelagem da fonte sonora a partir da subdivisão geodésica da esfera se inicia com um icosaedro. Cada uma das faces desse icosaedro (figura 6a) é subdividida em triângulos (figura 6b). Esses triângulos são, então, projetados na superfície da esfera que circunscreve o icosaedro (figura 6c). Unindo-se os pontos centrais de cada triângulo com o centro da esfera, determina-se os raios.

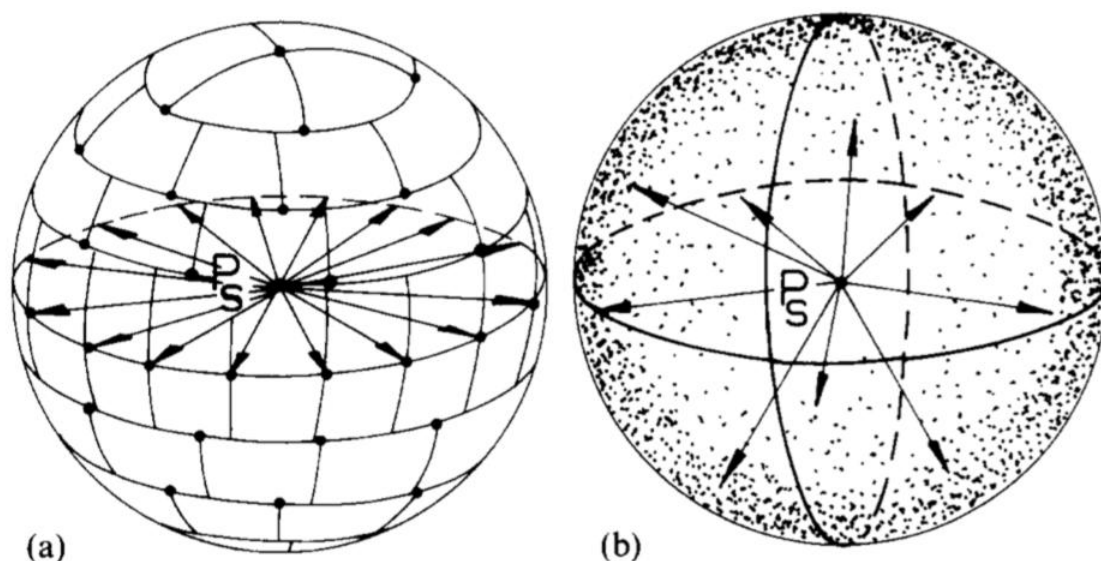


Figura 5 – Os métodos determinístico (a) e estatístico (b) para a obtenção das direções dos vetores uniformemente distribuídos ao redor da fonte. [6]

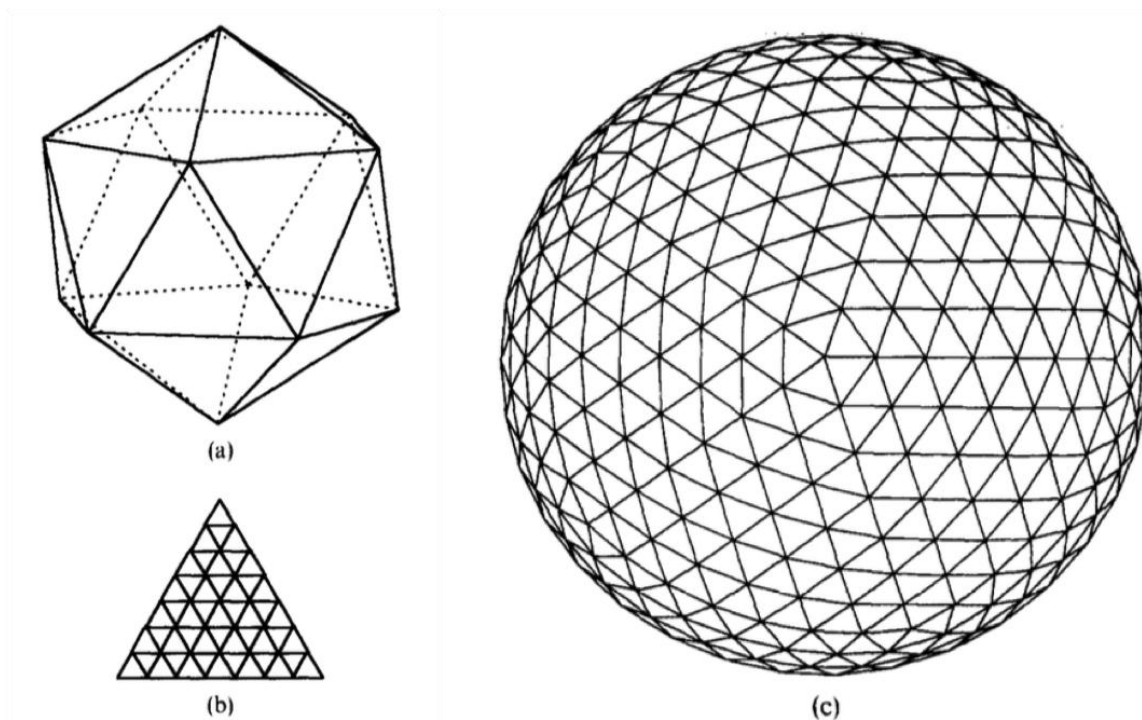


Figura 6 – Uma fonte onidirecional obtida pela subdivisão geodésica da esfera. [15]

Existem também algumas formas de se modelar o receptor. Como visto em [16], duas dessas formas consistem em modelar o receptor como uma esfera ou como um disco circular.

Modelado como uma esfera, o receptor é centralizado em um ponto e a energia por ele absorvida é descrita pela seguinte equação:

$$E_r = \frac{L}{2R} E \quad (7)$$

sendo  $L$  o comprimento do raio que o atravessa,  $R$  o seu raio e  $E$  a energia do raio que o atinge. Contudo, segundo [16], uma forma mais adequada de se modelar o receptor é como um disco circular centralizado num ponto. Deste modo o disco rotaciona em torno de seu eixo para que cada raio o atinja perpendicularmente e a energia dos raios é convertida em intensidade por meio da seguinte equação:

$$I_r = \sum_i \frac{E_i}{\pi r^2} \quad (8)$$

sendo  $r$  o raio do disco receptor e  $E_i$  a energia de cada raio que o atinge em determinado instante de tempo.

Estando definidos a sala, a fonte sonora e o receptor, pode-se iniciar o algoritmo descrito pelo fluxograma da figura 4. O primeiro teste a ser feito determina quais planos o raio atual atinge, pois como a sala é modelado por planos geométricos, o raio pode atingir mais de um plano, como exemplifica a figura 7:

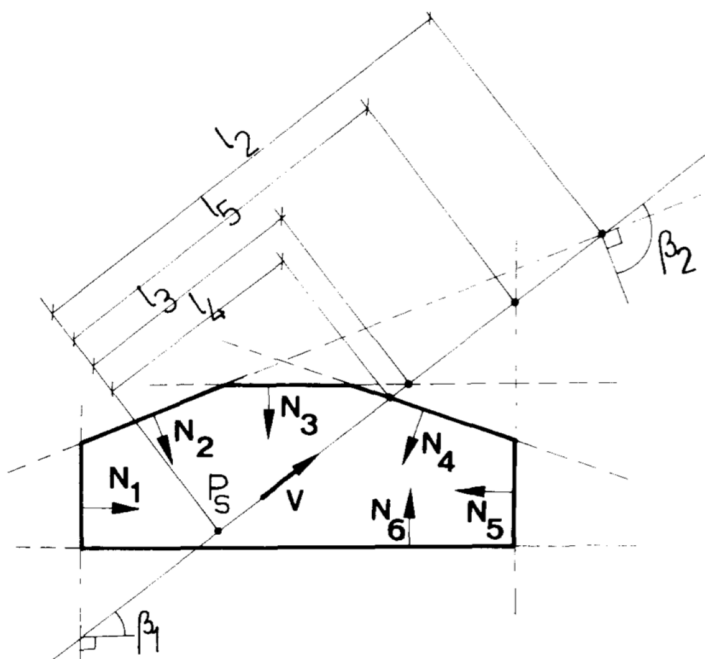


Figura 7 – Seção transversal de uma sala convexa. [6]

Na figura 7, tem-se que:

- $v$ : o vetor paralelo ao raio;
- $N_i$ : os vetores normais aos planos que definem a sala e voltados para o interior dela, sendo  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;
- $\beta_1, \beta_2$ : os ângulos entre os vetores  $N_1$  e  $N_2$  com  $v$ ;
- $P_s$ : a fonte sonora;
- $l_k$ : a distância percorrida pelo raio desde a fonte sonora até o encontro com os planos  $k = 2, 3, 4, 5$ .

No caso da figura acima, o raio definido pelo ponto  $P_s$  e pelo vetor direção  $v$  atinge os planos de número 2, 3, 4 e 5. Matematicamente, determina-se os planos que o raio atinge por meio da seguinte equação [6]:

$$N_i \cdot v > 0 \quad (9)$$

Caso o produto escalar acima seja positivo, o ângulo  $\beta$  entre o vetor normal ao plano e o vetor direção do raio é agudo e o plano não reflete o raio. Após esse teste, é calculada a distância percorrida pelo raio até encontrar cada um dos planos. O plano correspondente à menor distância é aquele que refletirá o raio.

Após essa definição, deve-se determinar a direção que o raio refletido tomará. Isso é possível por meio da seguinte equação [6], que é exemplificada pela figura 8:

$$P'_s = P_s - N_r 2d \quad (10)$$

sendo  $P'_s$  as coordenadas cartesianas da imagem da fonte sonora,  $N_r$  o vetor normal ao plano que reflete o raio e  $d$  a distância entre a fonte sonora e sua projeção o plano refletor.

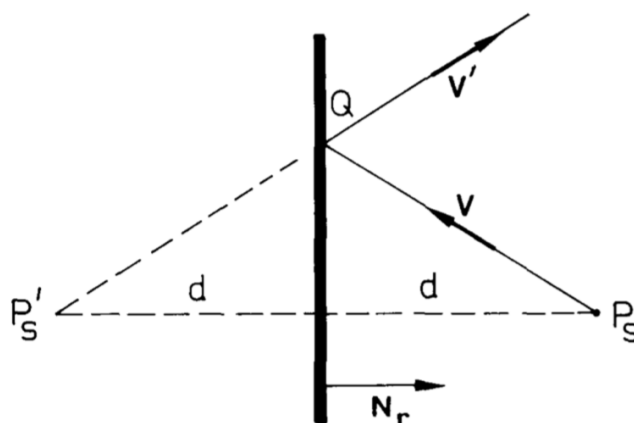


Figura 8 – Reflexão do raio determinado pelo ponto  $P_s$  e pelo vetor  $v$  pelo plano determinado pelo ponto  $Q$  e pelo vetor  $N_r$ . [6]

Além disso, devem ser consideradas as perdas de energia do raio que ocorrem na reflexão e no contato com o ar. Na reflexão, a perda de energia é calculada de acordo com o coeficiente de absorção  $\alpha_r$  de cada plano, que varia de 0 a 1, segundo a seguinte equação:

$$E_r = E_i(1 - \alpha_r) \quad (11)$$

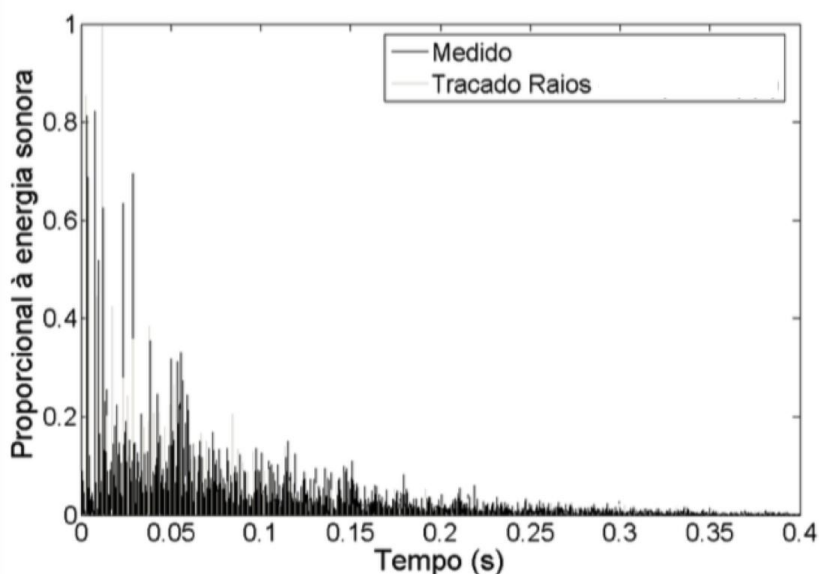
sendo  $E_r$  a energia do raio refletido e  $E_i$  a energia do raio incidente.

Segundo [6], pelo contato com o ar o raio perde energia de acordo com a seguinte equação:

$$E_{d_2} = E_{d_1} e^{-m(d_2-d_1)} \quad (12)$$

sendo  $E_{d_1}$  e  $E_{d_2}$  as energias do raio às distâncias  $d_1$  e  $d_2$  da fonte sonora respectivamente, com  $d_1 < d_2$ , e  $m$  o coeficiente de atenuação do som no ar.

É por meio desses procedimentos que a trajetória de um raio pode ser traçada dentro de uma sala. O algoritmo tem fim quando as trajetórias de todos os raios emitidos pela fonte são mapeadas, bem como as energias e os instantes de tempo em que esses raios atingem o receptor. O resultado esperado, após a compilação desses dados de tempo e energia, é um histograma que representa a função resposta ao impulso da sala estudada, como mostra a figura 9.

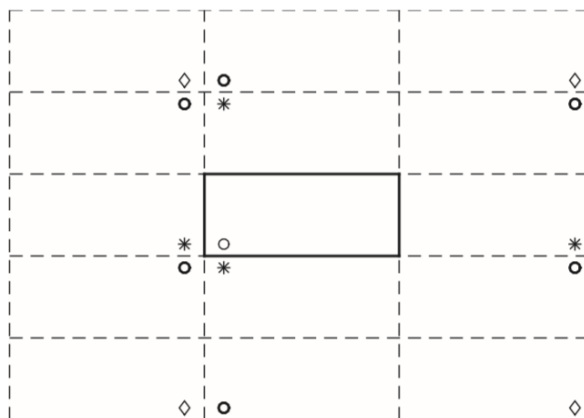


**Figura 9 – Funções Resposta ao Impulso medidas experimentalmente e calculada pelo algoritmo do Traçado de Raios com receptor modelado como disco circular. [5]**

## 2.2. O MÉTODO DAS FONTES VIRTUAIS

O método das Fontes Virtuais é descrito em vários trabalhos, como em [2], [5], [11] e [17]. Seu produto final é uma Resposta ao Impulso de uma sala obtida por

meio da soma da contribuição sonora de várias fontes virtuais, geradas a partir da fonte original, como mostra a figura 10.



**Figura 10 – Arranjo espacial em duas dimensões das fontes virtuais. [2]**

Cada fonte virtual é obtida por meio do espelhamento de outra fonte em relação a uma parede. Fontes virtuais obtidas a partir da fonte original são ditas de primeira ordem, enquanto que fontes virtuais obtidas a partir de fontes de primeira ordem são ditas de segunda ordem e assim em diante. Na figura acima, a sala original é delimitada em negrito e a fonte original é representada por um círculo. As fontes virtuais de primeira ordem são representadas por asteriscos, as fontes virtuais de segunda ordem são representadas por círculos em negrito e as fontes virtuais de terceira ordem são representadas por losangos.

A figura 10 representa o método em duas dimensões apenas, com quatro reflexões de primeira ordem, oito reflexões de segunda ordem diferentes (apenas seis são mostradas) etc. Com três dimensões e seis paredes, o caso correspondente teria seis reflexões de primeira ordem, trinta de segunda ordem etc. O número total de fontes virtuais  $N_{fv}$  para o método das Fontes Virtuais pode ser calculado, segundo [2], por meio da seguinte equação:

$$N_{fv} = \sum_{k=1}^K N(N-1)^{k-1} \quad (13)$$

sendo K a ordem máxima das reflexões e N o número de paredes.

O critério de parada para o método pode ser definido por duração da Resposta ao Impulso desejada ou número máximo de ordem das reflexões. Além



disso, são consideradas apenas paredes rígidas com todas as reflexões idealmente especulares.

Duas diferenças com o Traçado de Raios existem na concepção do método das Fontes Virtuais: não são definidos os raios emitidos pela fonte sonora e o receptor não é modelado como uma esfera ou um disco circular, pois ele é pontual.

Logo, para a execução do método são necessárias as seguintes informações: número de pontos de resposta ao impulso desejados (relacionado ao período de amostragem), localização da fonte sonora, localização do receptor, coeficiente de absorção do ar e definição das paredes da sala, por meio de ponto, reta normal e coeficiente de absorção.

A recursividade do método consiste na determinação de todas as fontes virtuais até que o critério de parada definido seja atingido. Pode-se realizar essa determinação de duas maneiras, segundo [2]: por amplitude ou profundidade, segundo a figura 11:

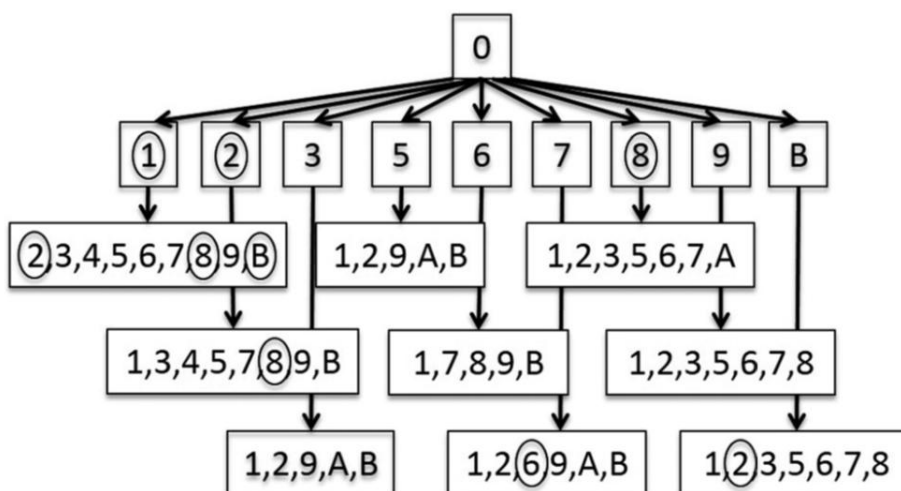


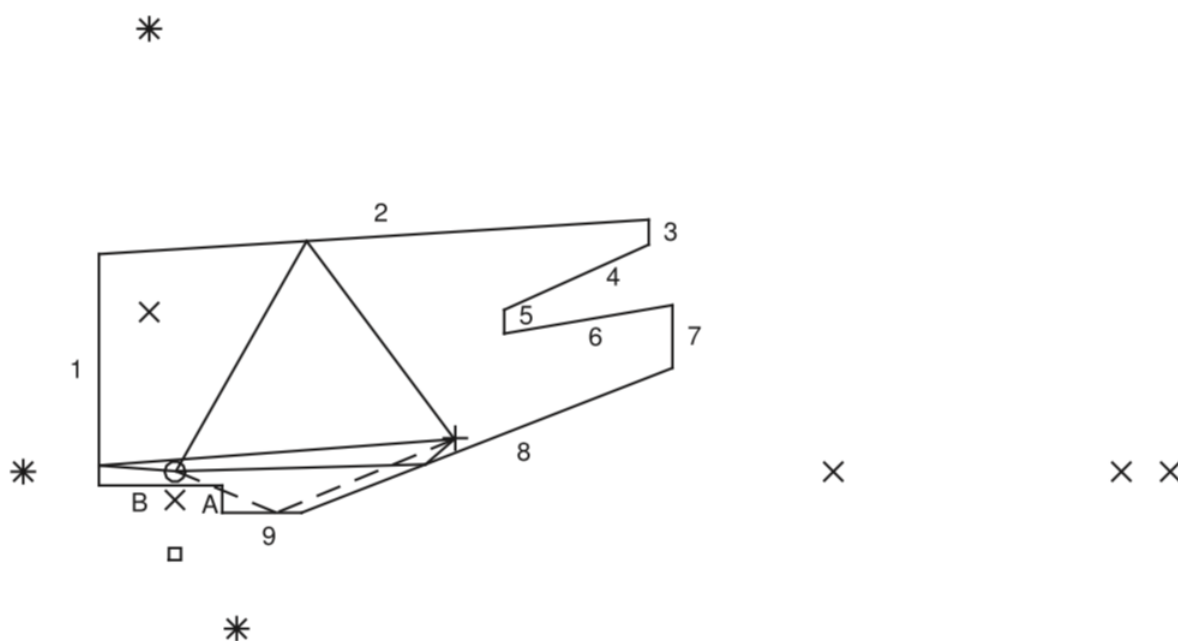
Figura 11 – Árvore de fontes virtuais. [2]

Sendo a fonte original representada por 0 e as paredes da sala, em duas dimensões e segundo a figura 12, representadas por 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A e B. As fontes virtuais visíveis estão envolvidas por uma elipse.

Varrendo-se as fontes por amplitude, determina-se a posição de todas as fontes virtuais da uma mesma ordem para então passar para as fontes da próxima ordem. Nesse caso, cada nível da árvore de fontes virtuais é determinado consecutivamente de cima para baixo. Varrendo-se as fontes por profundidade,

determina-se a posição de todas as fontes virtuais de um mesmo ramo da árvore para então passar para as fontes do próximo ramo.

Para determinar a reflexão de uma fonte em relação a uma parede, utiliza-se a mesma lógica apresentada na figura 8, sendo  $P'_s$  a fonte virtual gerada por  $P_s$ . A partir da distância  $d$  entre  $P_s$  e a parede, determina-se  $P'_s$ , que está, simultaneamente, a uma distância  $2d$  de  $P_s$  e a uma distância  $d$  da parede.



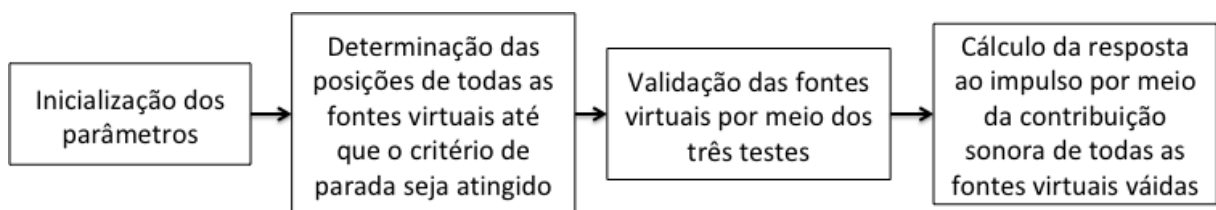
**Figura 12 – Exemplo de uma sala estudada pelo método das Fontes Virtuais. [2]**

Na figura 12, são representadas a fonte original, o receptor (representado por uma cruz) e as fontes virtuais de primeira ordem. As fontes virtuais de primeira ordem válidas (geradas pelas paredes 1, 2 e 8) são representadas por asteriscos e seus respectivos caminhos de reflexão são linhas sólidas. Por outro lado, as fontes virtuais de primeira ordem com pontos de reflexão fora do polígono que delimita a sala (geradas pelas paredes 3, 5, 6, 7 e B) são representadas por letras "X". As fontes geradas pelas paredes 4 e A são de mesma natureza, mas não foram representadas na figura. Ainda é representada com um quadrado uma fonte virtual de primeira ordem (gerada pela parede 9) cujo ponto de reflexão é válido, mas o caminho da reflexão (em linha pontilhada) é obstruído.

A contribuição sonora de uma fonte virtual apenas é calculada se ela passar por três testes: o de validade, o de proximidade e o de visibilidade [2], [5]. Como descrito brevemente na seção 1.2, os testes são os seguintes:

- Teste de validade: uma fonte virtual só é válida se for gerada por uma reflexão em uma parede diferente da que a gerou. Deste modo, o algoritmo que implementa o método das Fontes Virtuais deve salvar as informações de qual parede gerou qual fonte virtual;
- Teste de proximidade: uma fonte virtual só é válida se está a uma distância da fonte original menor do que uma distância estabelecida pelo usuário. Esse pode também ser um critério de parada para as iterações de determinação das posições das fontes virtuais;
- Teste de visibilidade: esse teste requer a posição do receptor, que é modelado como um ponto. É traçado um caminho de reflexões especulares desde a fonte original até o receptor, conforme a figura 12. Para que a fonte virtual seja visível, esse caminho deve atingir todas as paredes dentro de suas delimitações dentro da sala e não deve atravessar nenhuma outra parede da sala. De acordo com essas premissas, na figura 12, apenas as fontes virtuais geradas pelas reflexões nas paredes 1, 2 e 8 são visíveis.

Sendo assim, um algoritmo que implementa o método das Fontes Virtuais é composto basicamente pelas seguintes etapas:



**Figura 13 – Fluxograma básico do método das Fontes Virtuais.**

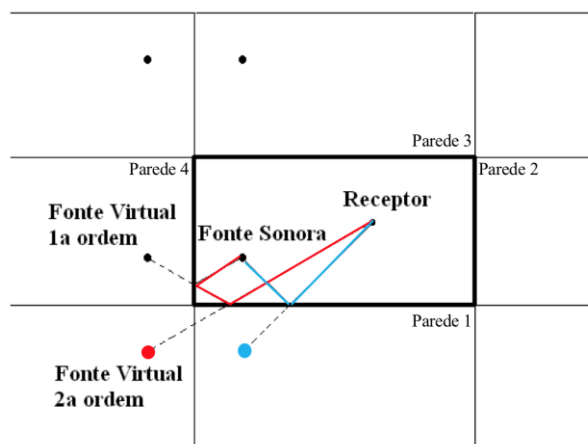
### 3. O MÉTODO HÍBRIDO ENTRE O TRAÇADO DE RAIOS E AS FONTES VIRTUAIS

O método híbrido entre o Traçado de Raios e as Fontes Virtuais, segundo [11] se baseia na determinação das fontes virtuais visíveis por meio do Traçado de Raios. Como visto na seção 2.2, uma desvantagem do método das Fontes Virtuais é a necessidade de verificar quais fontes virtuais são visíveis pelo receptor. Essa tarefa é muito dispendiosa computacionalmente, pois o número total de fontes virtuais em relação ao número de fontes visíveis é muito alto, chegando a  $10^{12}$ , segundo [11].

Esse teste de visibilidade pode, contudo, ser realizado por meio do método do Traçado de Raios, que dispense menos tempo de processamento computacional do que o método das Fontes Virtuais para uma mesma sala. Sendo assim, realiza-se o Traçado de Raios salvando todas as paredes em que cada raio que atingiu o receptor foi refletido, em ordem. Dessa lista de raios e paredes, pode-se localizar todas as fontes virtuais que são visíveis para o receptor, dispensando o teste de visibilidade com todas as fontes virtuais possíveis. Após essa determinação, realiza-se o método das Fontes Virtuais mais rapidamente, sem a onerosa operação do teste de visibilidade. Deste modo, são combinadas a rapidez computacional do método do Traçado de Raios e a precisão da resposta ao impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais.

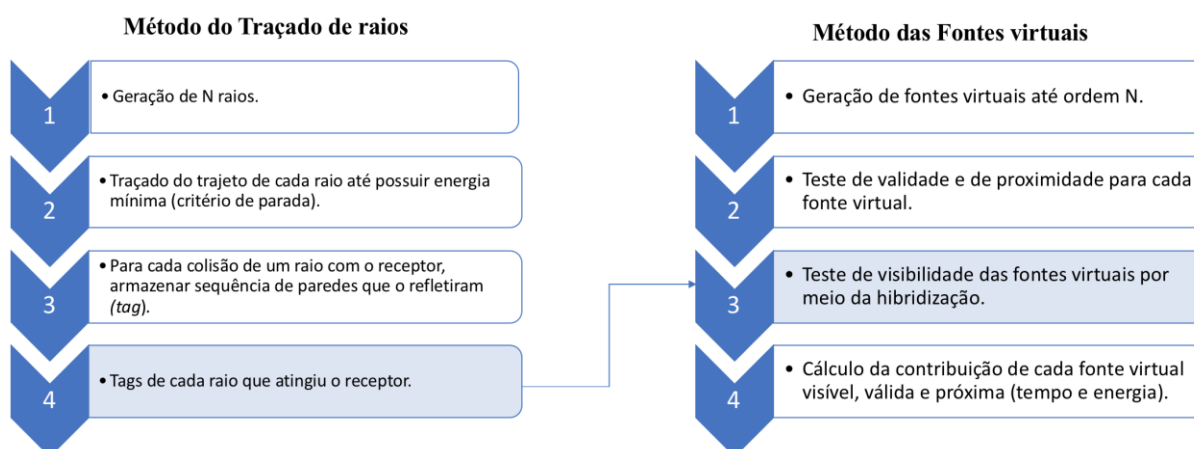
Essa combinação se dá por meio da correlação entre raios e fontes virtuais. Para cada raio que atinge o receptor é gerada uma *tag*, que é a sequência de paredes que refletiram o raio até o momento. Com as *tags* de todos os raios que atingiram o receptor, são separadas apenas as fontes virtuais correspondentes a esses raios.

Isso somente é possível pois um paralelo entre os dois métodos pode ser definido: por exemplo, um raio refletido por determinadas paredes corresponde à fonte virtual gerada pelas reflexões da fonte inicial nas mesmas paredes. A figura 14 exemplifica essa relação. O raio vermelho, refletido nas paredes 1 e 4 (*tag* 14), corresponde à fonte virtual em vermelho, gerada pela reflexão da fonte original nas paredes 1 e 4 (*tag* 14). O mesmo vale para o raio e a fonte virtual azuis (ambos com *tag* 1).



**Figura 14 – Esquema de correlação entre os raios do método do Traçado de raios e as fontes do método das Fontes Virtuais. Adaptado de [5].**

Com isso, determina-se todas as fontes virtuais que efetivamente colaboram para a resposta ao impulso. A figura 15 demonstra o fluxograma do método híbrido, que se aproveita do resultado do método do Traçado de raios para calcular mais rapidamente a resposta ao impulso por meio do método das Fontes virtuais.



**Figura 15 - Fluxograma do algoritmo híbrido combinando os métodos do Traçado de raios e das Fontes virtuais.**

Há ainda um problema a ser resolvido, que é a diferença entre os receptores utilizados nos dois métodos. Se no Traçado de Raios o receptor é modelado como uma esfera ou um disco circular, no método das Fontes Virtuais o receptor é pontual. Deste modo, nem todos os raios percebidos pelo receptor do Traçado de Raios atingem o receptor pontual.

Existem duas soluções para esse problema, segundo [11]:

- Desprezar esse efeito e prosseguir o processamento mesmo com os raios “errados”, dependendo do tamanho do receptor do Traçado de Raios;
- Realizar o método das Fontes Virtuais convencional para verificar a visibilidade de todos as fontes virtuais classificados como visíveis pelo Traçado de Raios. Essa operação não é onerosa computacionalmente, pois trataria apenas de fontes virtuais já escolhidas previamente, e não do grande universo que contempla todas elas.

O ganho computacional com a implementação desse método está descrito no gráfico da figura 3, mostrando que o cálculo de resposta ao impulso com duração maior do que **150 ms** é inviável por meio do método das Fontes Virtuais e viável por meio desse algoritmo híbrido.

## 4. RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS DE ACÚSTICA GEOMÉTRICA

### 4.1. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para avaliar o desempenho dos métodos implementados, serão utilizados os parâmetros acústicos EDT, T20 e Definição, além do parâmetro estatístico MSE. Enquanto os parâmetros acústicos estão relacionados às características do ambiente, como coeficiente de absorção das paredes e geometria, o MSE é uma comparação entre dois sinais (no caso, entre duas Resposta ao Impulso) e depende do método pelo qual cada um foi obtido. As Respostas ao Impulso serão avaliadas também por dois gráficos: um de energia por tempo (Resposta ao Impulso propriamente dita) e outro de amplitude em decibéis por tempo (Curva de Decaimento).

#### 4.1.1. Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

O Tempo de Decaimento Inicial é derivado da Curva de Decaimento entre **0 dB** e **10 dB** abaixo do nível inicial. Um valor de EDT baixo se correlaciona com boa clareza de fala, já que as reflexões iniciais até  $t = 0,05 s$  em conjunto com a incidência direta do som melhoram a clareza da fala [18].

#### 4.1.2. Tempo de Reverberação (T20)

A reverberação é o som que persiste num ambiente fechado mesmo após a fonte sonora ter parado de emitir ondas. É um parâmetro importante para a acústica de salas, pois se relaciona à inteligibilidade da fala e da música [18].

O Tempo de Reverberação é o tempo que a intensidade de um som leva para decair em **60 dB**. Contudo, como na prática essa medição é difícil, pois a medição do som numa faixa dinâmica de **60 dB** depende de ótimas condições, faz-se a medição do decaimento de **20 dB** da energia e extrapola-se linearmente esse valor para se obter o Tempo de Reverberação. Determinado dessa maneira, o Tempo de Reverberação é denominado de T20.

#### 4.1.3. Definição (D50)

A Definição é a razão entre a energia de um sinal até  $t = 0,05 s$  e sua energia total. É um parâmetro que se também se relaciona com a inteligibilidade da fala. Quanto maior o valor de D50, menor o Tempo de Reverberação e o Tempo de Decaimento Inicial de uma sala.

#### 4.1.4. Erro Médio Quadrático (MSE)

É uma medida da qualidade de um estimador e possui sempre valores não negativos. Um MSE é melhor quanto mais próximo de zero for seu valor. Ele é, basicamente, a média dos quadrados dos erros entre duas séries de valores, uma sendo a base e outra sendo a estimadora. O MSE entre as séries de valores  $x_i$  e  $y_i$ , ambas com  $n$  elementos, é calculado pela equação 14:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n} \quad (14)$$

#### 4.1.5. Curva de Decaimento

A curva de decaimento de uma Resposta ao Impulso indica a quantidade de energia ainda a chegar no receptor a cada instante de tempo. Ou seja, a cada instante de tempo  $t$ , o valor da curva de decaimento é a soma da energia da Resposta ao Impulso desde  $t$  até o tempo máximo  $T$ .

Curvas de decaimento muito íngremes indicam que a energia decai rapidamente, acarretando em baixos tempos de reverberação (T20), baixos tempos de decaimento inicial (EDT) e altos valores de definição (D50). Por outro lado, curvas de decaimento suaves indicam que a Resposta ao Impulso perde energia lentamente, o que indica um ambiente altamente reverberante.



## 4.2. AMBIENTE SIMULADO

O ambiente estudado é uma sala em formato caixa de sapato (*shoe box*) de dimensões 4 m x 5 m x 3 m. Todas as paredes foram consideradas uniformes com coeficiente de absorção igual a 0,1 e a atenuação do ar foi desprezada. Com referencial de coordenadas cartesianas  $(0, 0, 0)$  m num canto inferior da sala, a fonte sonora está posicionada na coordenada  $(1, 1, 1)$  m e o receptor na coordenada  $(2, 3, 4)$  m. O modelo de fonte utilizado foi baseado na subdivisão geodésica do icosaedro [5] e o receptor utilizado foi modelado por uma circunferência que gira em torno de seu centro para que todos os raios a atinjam perpendicularmente [5].

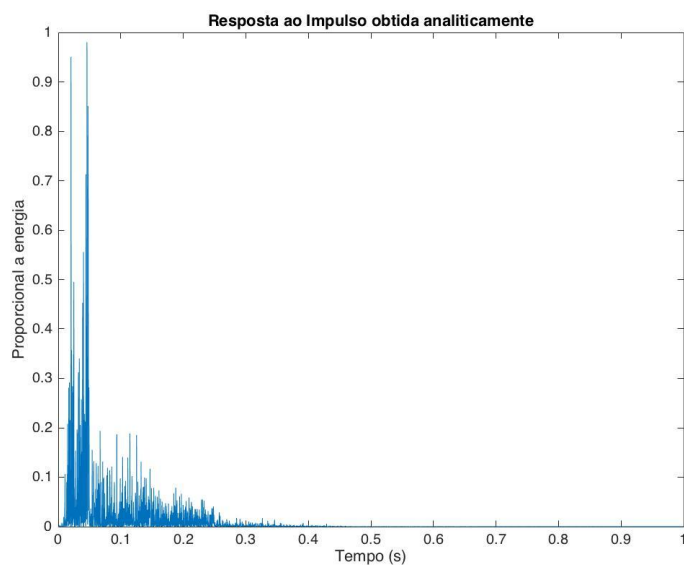
## 4.3. OBTENÇÃO DE RESPOSTA AO IMPULSO ANALÍTICA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Uma resposta ao impulso analítica foi gerada, baseada na superposição modal, conforme descrito em [19] (pg. 70, equação 3.8), que leva em conta o tempo de reverberação, as dimensões da sala e as posições de fonte sonora e receptor. Para a implementação da referida equação, uma rotina otimizada, gentilmente cedida pelo Prof. Eric Brandão (UFSM), foi utilizada.

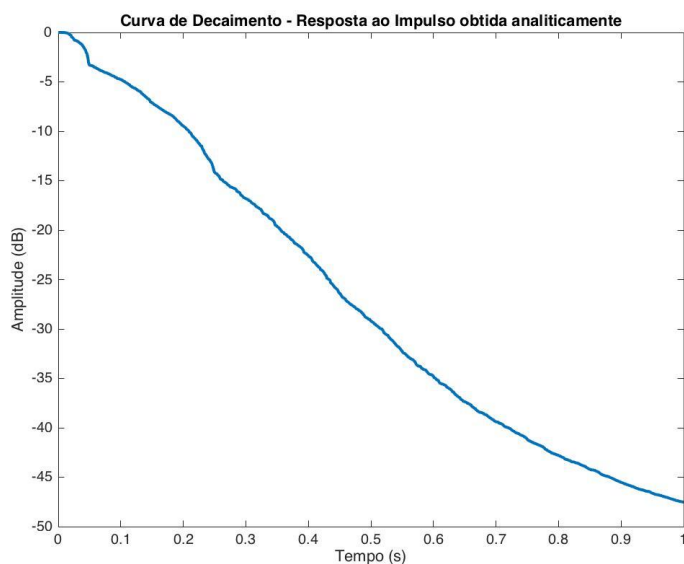
## 4.4. RESULTADOS GERAIS

### 4.4.1. Resposta ao Impulso obtida analiticamente

A Resposta ao Impulso obtida analiticamente apresentou o seguinte comportamento, de acordo com as figuras 16 e 17:



**Figura 16 – Resposta ao Impulso obtida analiticamente.**



**Figura 17 – Curva de Decaimento da Resposta ao Impulso obtida analiticamente.**

A tabela 1 apresenta os parâmetros acústicos relativos à Resposta ao Impulso acima:

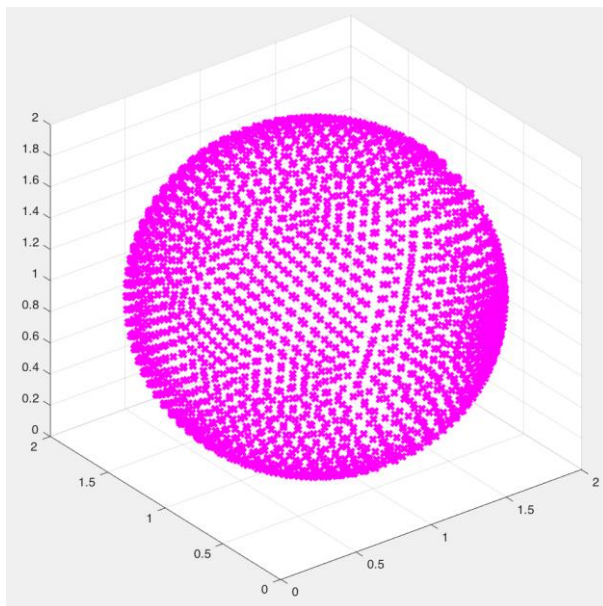
**Tabela 1 – Parâmetros acústicos relativos à Resposta ao Impulso obtida analiticamente.**

	Resposta ao Impulso Analítica
MSE RIR (proporcional à energia)	-
MSE Decaimento (dB)	-
EDT (s)	1,254
T20 (s)	0,978
Definição	0,5339

Como os MSEs serão calculados tendo como base esse resultado, a tabela 1 não apresenta valores nesses campos. O resultado analítico servirá de referência para comparação com as Resposta ao Impulso dos métodos propostos. Haverá valores de MSE para as Respostas ao Impulso obtidas pelos métodos a seguir. Os valores de EDT e T20 indicam a natureza do decaimento da função, enquanto que a Definição com valor de 0,5339 indica que 53,39% de toda a energia da Resposta ao Impulso está contida nos primeiros 50 ms. Para que esses resultados estejam melhor situados, deve-se compará-los com os resultados dos métodos a seguir.

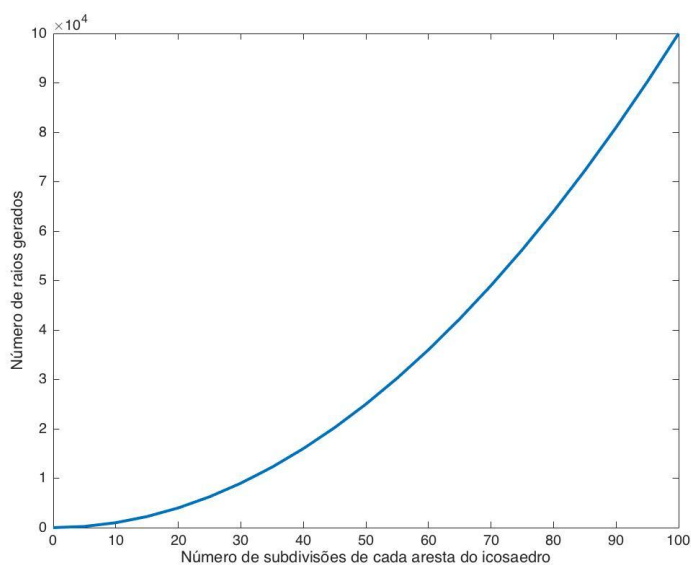
#### 4.4.2. Método do Traçado de Raios

Utilizando-se do método da subdivisão geodésica da esfera, foi desenvolvida uma função em MATLAB que gera as direções dos raios emitidos pela fonte sonora. Essa função tem como entrada o número de partes em que cada aresta de cada face do icosaedro é dividida. Quanto maior esse número, maior a densidade de raios emitidos pela fonte sonora e mais precisa a simulação feita pelo algoritmo do traçado de raios. A única diferença entre o método utilizado e o apresentado na figura 6 é que os raios são construídos por meio da união dos pontos de intercessão entre os triângulos com o centro da esfera e não dos centros dos triângulos. Um exemplo de fonte sonora gerada está descrito na figura 18:



**Figura 18 – Fonte sonora gerada por função desenvolvida em MATLAB com 15 divisões em cada aresta de cada face do icosaedro.**

Cada ponto em rosa descreve um raio emitido pela fonte, que está, no caso da figura 18, centralizada no ponto de coordenadas cartesianas  $(1, 1, 1)$  e possui raio igual a 1 metro. O número de raios gerados cresce exponencialmente em relação ao número de divisões de cada aresta do icosaedro segundo o gráfico da figura 19:

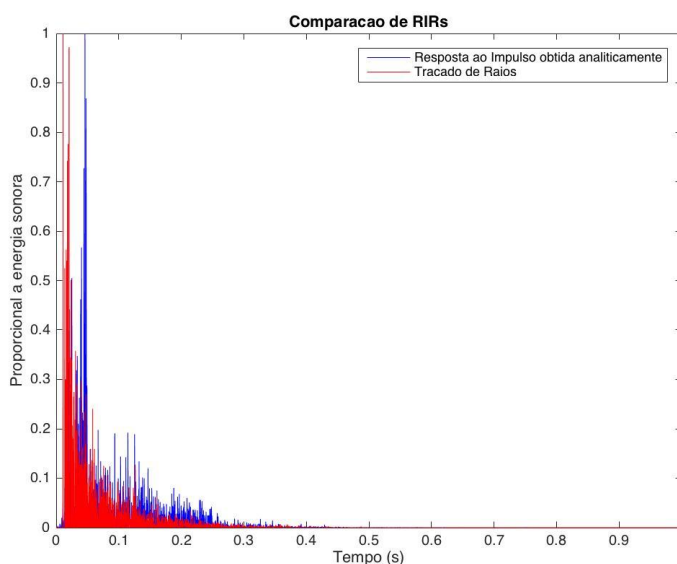


**Figura 19 – Comportamento da fonte sonora gerada por função no MATLAB.**

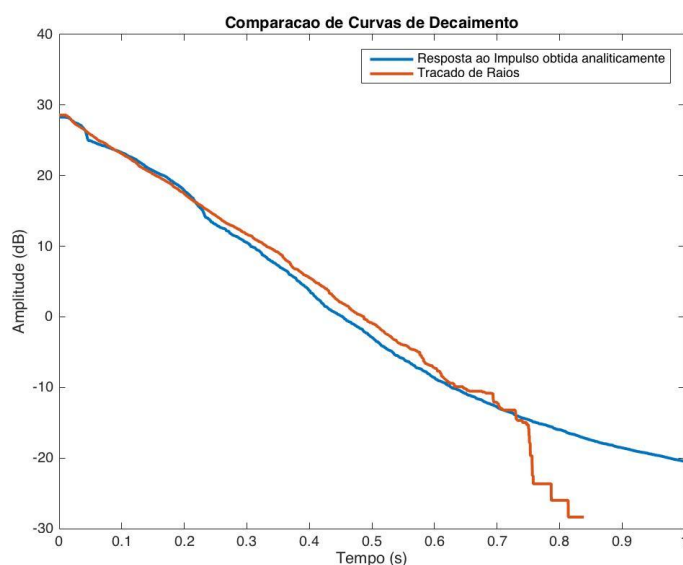
Com 100 divisões em cada aresta do icosaedro, tem-se cerca de 100000 raios partindo da fonte, o que é uma boa aproximação de uma fonte sonora real, segundo experimento realizado em [5]. Contudo, para otimizar o tempo de processamento do método, foram utilizados como parâmetros para o Traçado de Raios os seguintes valores, que ainda produzem resultado satisfatórios:

- 60.830 raios gerados pela fonte (78 divisões em cada aresta do icosaedro);
- Critério de parada:  $E_{min} = 0,001$ ;
- Raio do receptor:  $R_{rec} = 0,1 m$ .

As figuras 20 e 21 retratam o comportamento da Resposta ao Impulso obtida pelo método do Traçado de Raios em comparação com a Resposta ao Impulso obtida analiticamente:



**Figura 20 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios.**



**Figura 21 – Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios.**

A tabela 2 apresenta os parâmetros acústicos relativos à Resposta ao Impulso acima em comparação à Resposta ao Impulso obtida analiticamente:

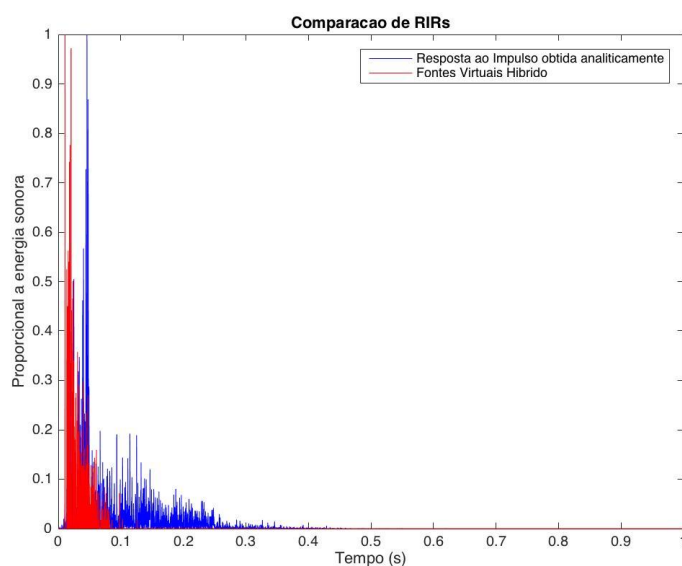
**Tabela 2 – Parâmetros acústicos e MSE relativos à Resposta ao Impulso obtida analiticamente e à Resposta ao Impulso obtida pelo método do Traçado de Raios.**

	Resposta ao Impulso Analítica	Traçado de Raios
MSE RIR (proporcional à energia)	-	0,1324
MSE Decaimento (dB)	-	13,8327
EDT (s)	1,254	1,024
T20 (s)	0,978	1,024
Definição	0,5339	0,4693

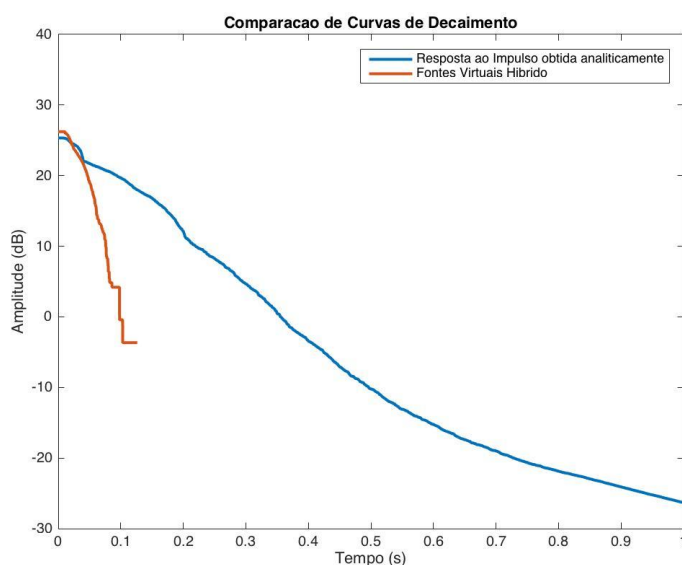
O elevado valor do MSE entre as curvas de decaimento é devido à porção das curvas após  $t = 0,75 s$ , quando a energia da Resposta ao Impulso obtida pelo método do Traçado de Raios cai bruscamente. Até esse tempo, contudo, ambas as curvas estão muito próximas, indicando que a simulação foi bem-sucedida. A Definição da Resposta ao Impulso obtida pelo método do Traçado de Raios indica maior distribuição da energia ao longo do tempo, com apenas 46,93% dela concentrada nos primeiros 50 ms.

#### 4.4.3. Método das Fontes Virtuais Híbrido

Para a implementação do método das Fontes Virtuais Híbrido foi utilizado como parâmetro a ordem máxima  $o_{max} = 8$  de fontes virtuais a serem geradas. As figuras 22 e 23 retratam o comportamento da Resposta ao Impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais Híbrido em comparação com a Resposta ao Impulso obtida analiticamente:



**Figura 22 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.**



**Figura 23 – Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.**

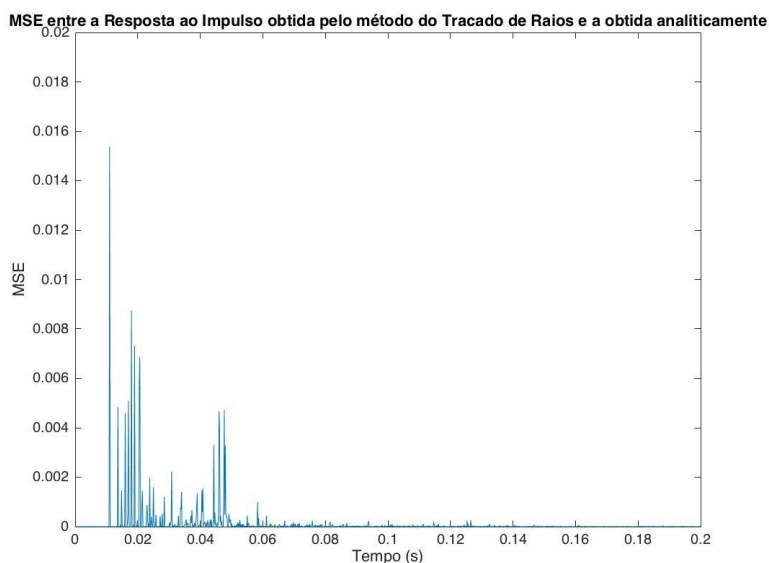
A tabela 3 apresenta os parâmetros acústicos relativos à Resposta ao Impulso acima em comparação às Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios:

**Tabela 3 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente, pelo método do Traçado de Raios e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.**

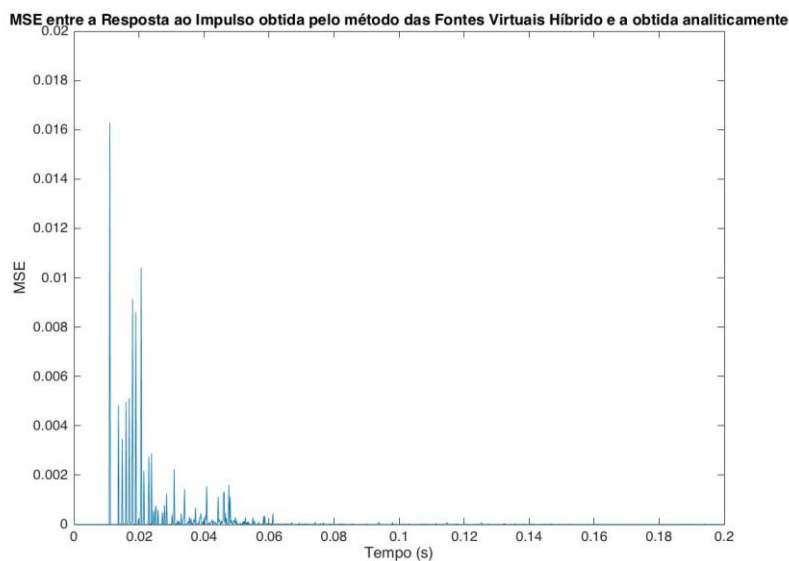
	Resposta ao Impulso Analítica	Traçado de Raios	Fontes Virtuais híbrido
MSE RIR (proporcional à energia)	-	0,1324	0,1067
MSE Decaimento (dB)	-	13,8327	176,2119
EDT (s)	1,254	1,024	0,286
T20 (s)	0,978	1,024	0,1675
Definição	0,5339	0,4693	0,8065

De acordo com o MSE entre as Respostas ao Impulso obtidas, o método das Fontes Virtuais Híbrido obteve um resultado mais próximo do analítico do que o método do Traçado de Raios. Visualmente, por meio das figuras 18 e 20, isso pode parecer improvável, mas por meio da análise do MSE entre as Respostas ao Impulso em cada instante de tempo, nas figuras 24 e 25, essa conclusão é tirada mais facilmente. Percebe-se que o MSE obtido pelo método das Fontes Virtuais Híbrido é sensivelmente menor o que o obtido pelo método do Traçado de Raios em torno do instante de tempo  $t = 0,045 s$ . Essa diferença ocorre devido à melhor aproximação do método das Fontes Virtuais Híbrido para esse trecho da Resposta ao Impulso obtida analiticamente, que corresponde ao seu segundo pico.





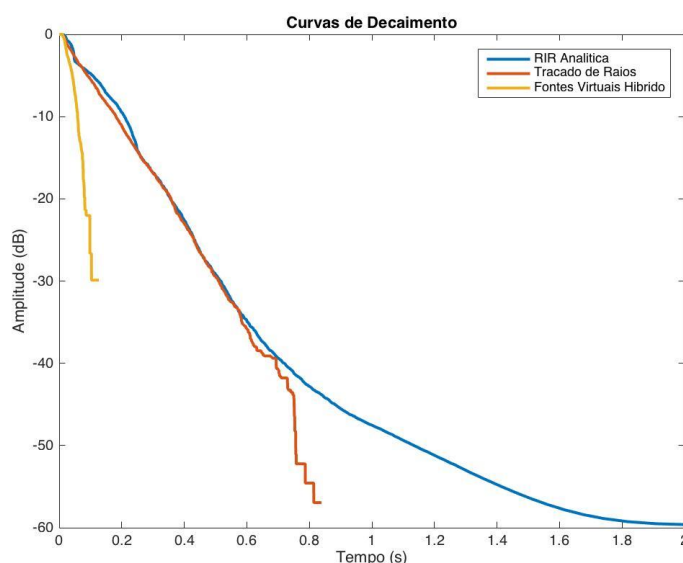
**Figura 24 – Análise em cada instante de tempo do MSE entre a Resposta ao Impulso obtida pelo método do Traçado de Raios e a obtida analiticamente.**



**Figura 25 – Análise em cada instante de tempo do MSE entre a Resposta ao Impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais Híbrido e a obtida analiticamente.**

O MSE da curva de decaimento da Resposta ao Impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais Híbrido é muito alto devido ao fato de ela acompanhar a curva da Resposta ao Impulso analítica apenas até cerca de  $t = 0,05 \text{ s}$ , segundo a figura 23. Contudo, como o método das Fontes Virtuais, devido a questões de processamento computacional, não produz Respostas ao Impulso suficientemente longas, essa disparidade é esperada.

Os baixos valores de EDT e T20 e o alto valor de Definição indicam, respectivamente, que a Resposta ao Impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais Híbrido decai muito rapidamente e está muito concentrada nos 50 ms iniciais. A figura 26 demonstra o comportamento das curvas de decaimento das três Respostas ao Impulso obtidas.



**Figura 26 – Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente, pelo método do Traçado de Raios e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.**

Para uma Resposta ao Impulso com maior amplitude temporal, simulações com  $\theta_{max} > 8$ , para o caso estudado, seriam adequadas. Essa necessidade de mais fontes virtuais para um resultado mais satisfatório se deve, em grande parte, ao fato de a sala estudada ser muito reverberante, com coeficiente de absorção igual a 0,1. Como o método das Fontes Virtuais Híbrido se utiliza das reflexões do método do Traçado de Raios, uma fonte virtual de ordem 8 equivale a um raio refletido oito vezes. E pela alta reverberação do ambiente, os raios ainda possuem uma energia significativa após oito reflexões (cerca de 40% da energia inicial), podendo ainda atingir o receptor após a oitava reflexão. Qualquer energia computada no método do Traçado de Raios após a oitava reflexão foi descartada pelo método das Fontes Virtuais Híbrido, prejudicando seu resultado. Para melhorar isso, fontes virtuais de maior ordem são necessárias.

#### 4.5. RESULTADOS COM DIFERENTES MODELOS

Os resultados descritos anteriormente não foram aprimorados com diferentes modelos que podem otimizá-los. Para entender o efeito desses modelos na Resposta ao Impulso, foram realizadas simulações com variação da uniformidade da fonte sonora e com implementação de reflexões difusas.

##### 4.5.1. Variação da uniformidade da fonte sonora

Foi analisado o desempenho do método do Traçado de Raios e do método das Fontes Virtuais Híbrido com fontes não uniformes. A densidade de raios que emana da fonte sonora faz parte dos parâmetros iniciais para o método do Traçado de raios e seu impacto foi avaliado em ambos os métodos aqui apresentados. A modelagem para variação da densidade de raios da fonte sonora foi realizada de modo a multiplicar por um número natural  $N$  a quantidade de raios original de uma porcentagem  $k$  da superfície da esfera. Essa superfície possui como centro um ponto  $P$  tal que

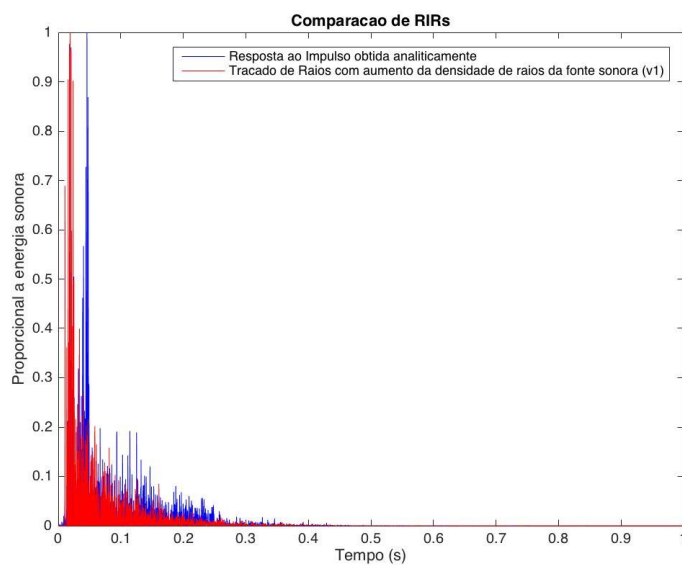
$$P = C + \vec{v} \quad (15)$$

sendo  $C$  o centro da fonte e  $\vec{v}$  um vetor que representa a direção ne qual a densidade de raios aumentará. As simulações foram realizadas aumentando-se a densidade de raios com parâmetro  $N = 2$  e  $k = 25\%$  para dois valores diferentes de  $\vec{v}$  segundo as equações 16 e 17:

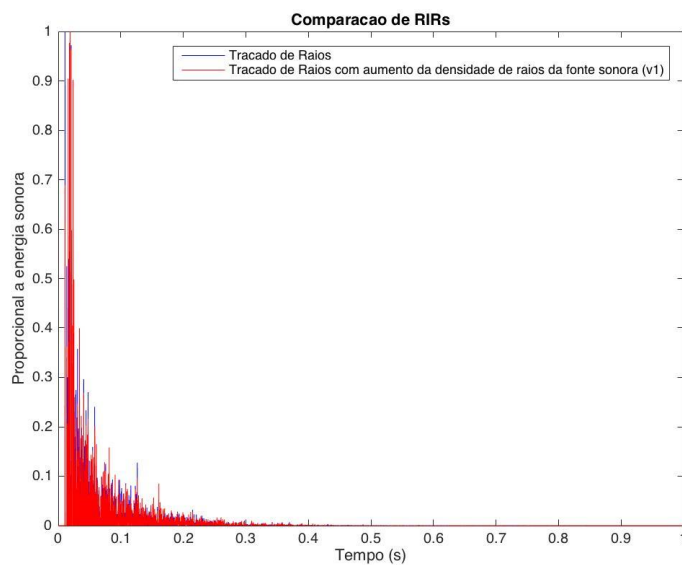
$$\vec{v}_1 = C_{receptor} - C \quad (16)$$

$$\vec{v}_2 = C - C_{receptor} \quad (17)$$

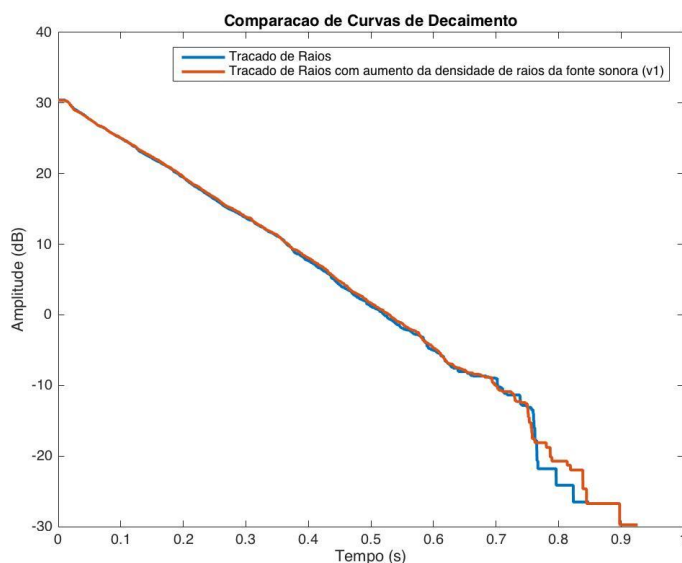
sendo  $C_{receptor}$  o centro do receptor sonoro. O número de raios emanados pela fonte nas simulações foi de 76037, o que equivale ao número original de 60830 multiplicado por 1,25. No método do Traçado de Raios os resultados foram os mostrados pelas figuras 27, 28, 29 e 30.



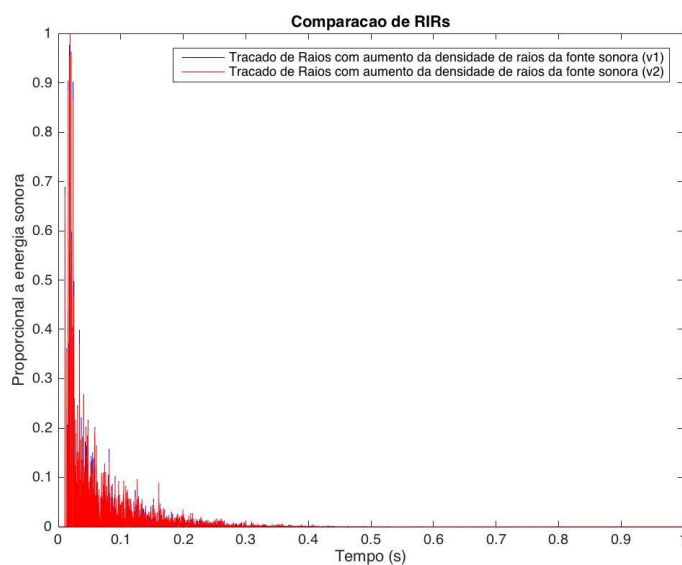
**Figura 27 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora não uniforme na direção  $\vec{v}_1$ .**



**Figura 28 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora uniforme e fonte sonora não uniforme na direção  $\vec{v}_1$ .**



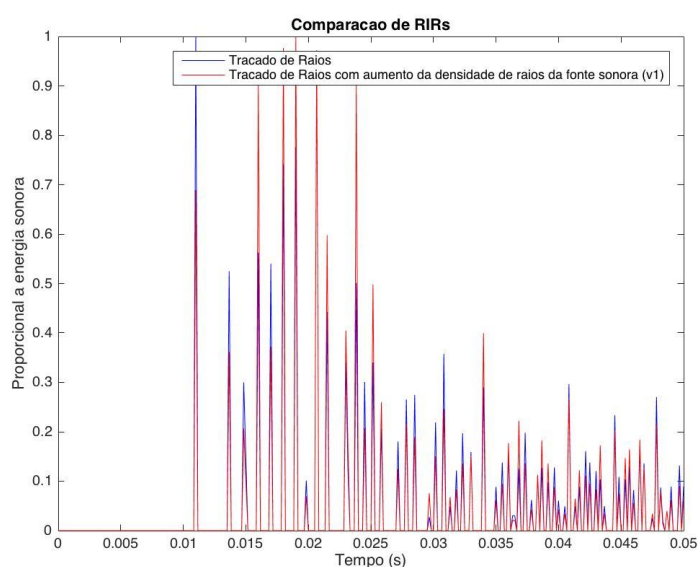
**Figura 29 – Comparação entre as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora uniforme e fonte sonora não uniforme na direção  $\vec{v}_1$ .**



**Figura 30 – Comparação entre as Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora não uniforme nas direções  $\vec{v}_1$  e  $\vec{v}_2$ .**

Nota-se com as figuras 27, 28, 29 e 30 que a modelagem não uniforme para a fonte sonora não melhorou significativamente os resultados já existentes do método do Traçado de Raios. Apesar disso, o aumento do número total de raios suavizou, de acordo com a figura 29, o decaimento de energia da Resposta ao Impulso simulada. A figura 30 demonstra que a diferença na direção da não uniformidade da

fonte não produziu resultados muito diferentes, o que provavelmente se deve à proximidade da fonte sonora à parede no ambiente estudado, causando reflexões rápidas dos raios direcionados à parede. Por outro lado, a figura 31 traz diferenças mais pronunciadas entre as Respostas ao Impulso obtidas com e sem fonte não uniforme, analisando seu trecho inicial.



**Figura 31 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas pelo método do Traçado de Raios com fonte sonora não uniforme nas direções  $\vec{v}_1$  e  $\vec{v}_2$ .**

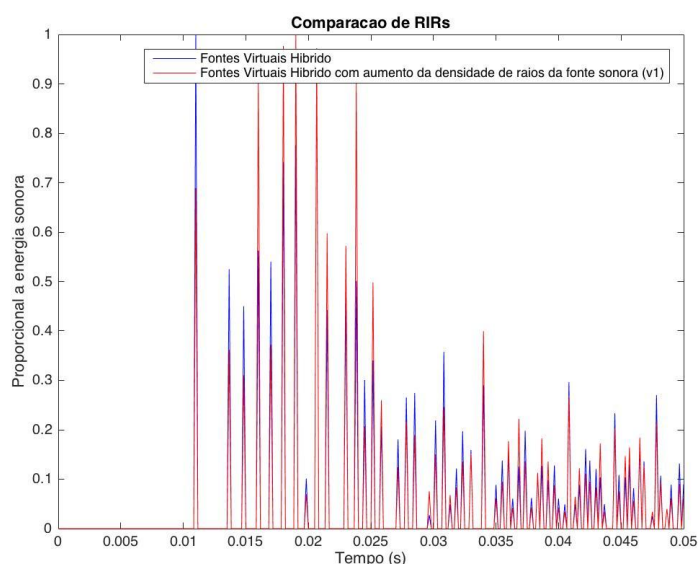
Tem-se, portanto, um pico maior de energia na Resposta ao Impulso obtida com fonte uniforme em cerca de  $t = 0,01 s$  enquanto que os picos de energia entre  $t = 0,015 s$  e  $t = 0,02 s$  são maiores na Resposta ao Impulso obtida com fonte não uniforme. Um provável motivo dessa discrepância é a maior quantidade de raios na direção do receptor no caso de fonte não uniforme, o que causa os maiores picos de energia em tempos ligeiramente maiores. A tabela 4 traz os parâmetros acústicos e MSE relativos às simulações acima.

**Tabela 4 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método do Traçado de Raios com fontes uniforme e não uniforme.**

	Análítica	Traçado de Raios	Traçado de Raios com fonte não uniforme (v1)	Traçado de Raios com fonte não uniforme (v2)
MSE RIR (proporcional à energia)	-	0,1324	0,3255	0,3274
MSE Decaimento (dB)	-	13,8327	20,9941	15,783
EDT (s)	1,254	1,024	1,059	1,054
T20 (s)	0,978	1,024	1,0435	1,0485
Definição	0,5339	0,4693	0,4572	0,4516

Tanto nos MSEs quanto nos parâmetros acústicos, a modelagem não uniforme da fonte sonora afastou o resultado do método do Traçado de Raios do resultado obtido analiticamente. Esse resultado, contudo, não é totalmente conclusivo, pois a não uniformidade da fonte sonora foi modelada apenas com um conjunto de parâmetros, que não se provaram eficientes. Mais investigações com parâmetros diferentes, como por exemplo com uma não uniformidade mais concentrada ( $k < 25\%$  e  $N > 2$ ) podem trazer resultados mais conclusivos.

Também, de acordo com a figura 32 e com a tabela 5, no método das Fontes Virtuais Híbrido a não uniformidade da fonte sonora não trouxe muito mais precisão aos resultados.



**Figura 32 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com fonte sonora não uniforme na direção  $\vec{v}_1$ .**

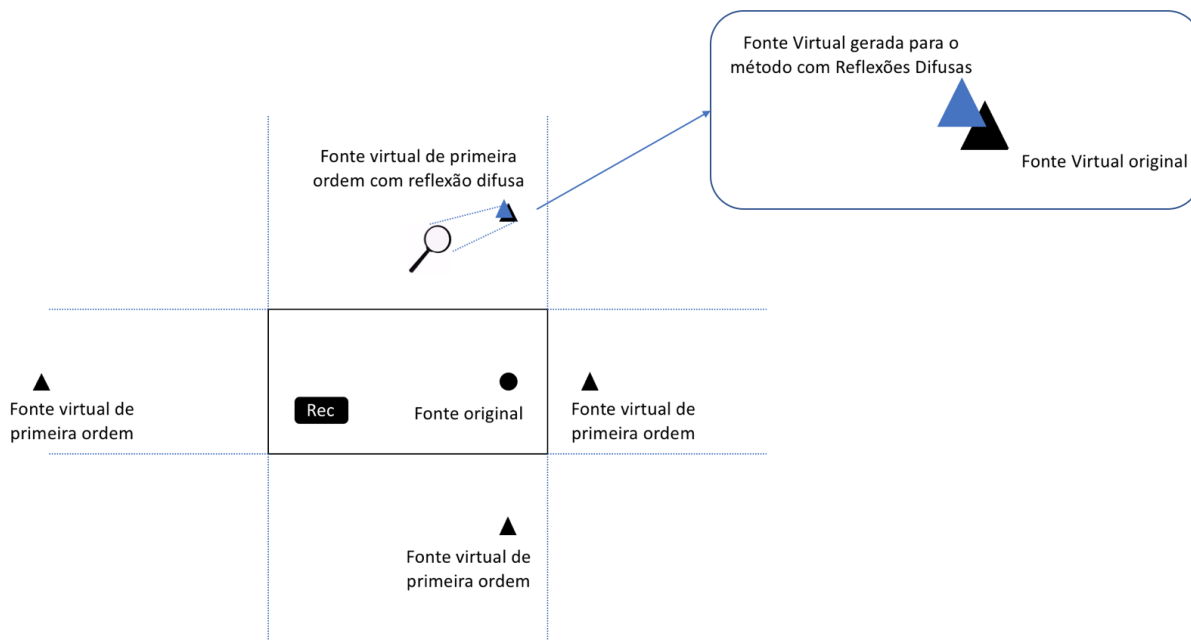
**Tabela 5 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com fontes uniforme e não uniforme.**

	Análítica	Fontes Virtuais híbrido	Fontes Virtuais híbrido proveniente de fonte não uniforme (v1)	Fontes Virtuais híbrido proveniente de fonte não uniforme (v2)
MSE RIR (proporcional à energia)	-	0,1067	0,2676	0,268
MSE Decaimento (dB)	-	176,2119	189,1953	188,973
EDT (s)	1,254	0,286	0,291	0,289
T20 (s)	0,978	0,1675	0,1675	0,1675
Definição	0,5339	0,8065	0,787	0,7835

É perceptível uma piora nos resultados de MSE e uma ínfima melhora nos parâmetros acústicos com a implementação do modelo de fonte sonora não uniforme no método das Fontes Virtuais Híbrido. A melhora nos parâmetros acústicos indica maior distribuição de energia ao longo do tempo, com valores maiores de EDT e valores menores de Definição.

#### 4.5.2. Reflexões difusas

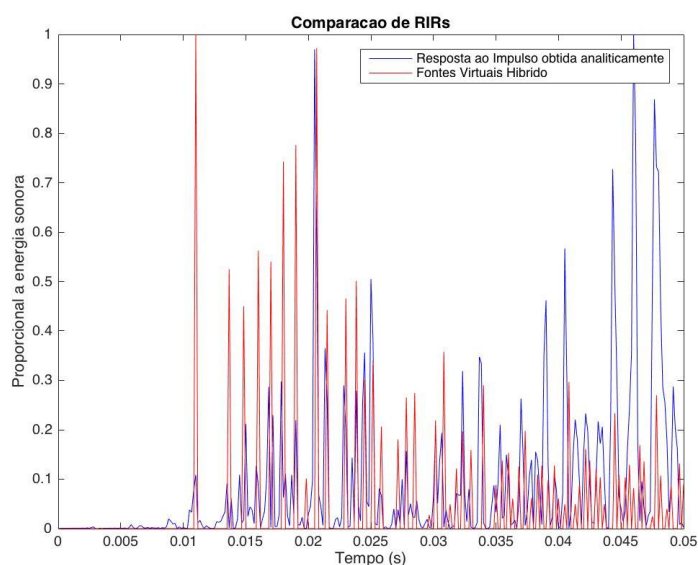
A rotina implementada para as reflexões difusas no método das Fontes Virtuais Híbrido é estatística e se baseia numa probabilidade  $p$  que determina se para cada fonte virtual serão criadas  $n$  fontes posicionadas aleatoriamente a uma distância  $d$  dela. Para que a energia total seja mantida, a energia de cada fonte após o procedimento é dividida por  $(n + 1)$ . Para as simulações realizadas, foram utilizados os parâmetros  $p = 0,5$ ,  $n = 1$  e  $d = 0,0001 m$ . A figura 33 ilustra como esse modelo funciona.



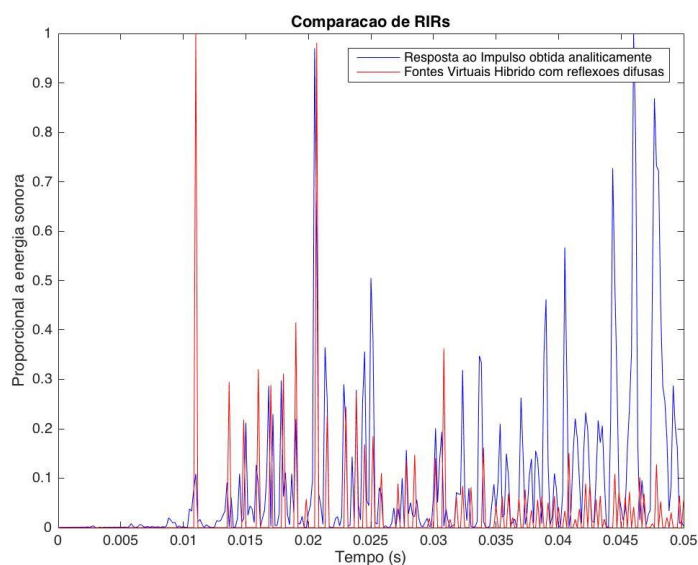
**Figura 33 – Ilustração do funcionamento do modelo de reflexões difusas implementado.**

Os resultados, com foco no trecho inicial das Respostas ao Impulso, são mostrados nas figuras 34 e 35.



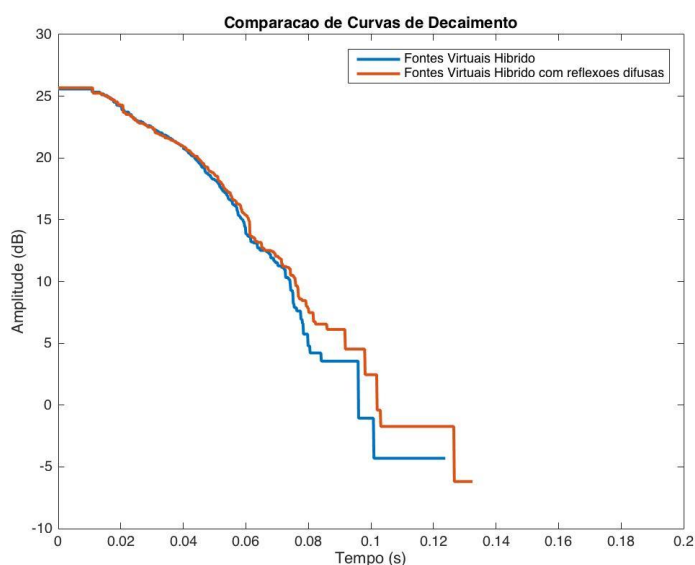


**Figura 34 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido.**



**Figura 35 – Comparação entre o trecho inicial das Respostas ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com reflexões difusas.**

Houve significativas diferenças entre as duas implementações do método das Fontes Virtuais Híbrido. Com as reflexões difusas há menos energia no trecho retratado até  $t = 0,05$  s, o que confere a essa implementação maior semelhança com a Resposta ao Impulso obtida analiticamente nas primeiras reflexões até  $t = 0,03$  s e maior disparidade após esse trecho. A figura 36 compara os decaimentos da Resposta ao Impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com reflexões difusas em relação à implementação sem reflexões difusas.



**Figura 36 – Comparação as Curvas de Decaimento das Respostas ao Impulso obtidas pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com e sem reflexões difusas.**

De acordo com a tabela 6, o MSE da Resposta ao Impulso obtida pelo método das Fontes Virtuais Híbrido sem reflexões difusas com relação à Resposta ao Impulso analítica é ligeiramente menor do que o MSE obtido pelo método com reflexões difusas. Aliando essa informação à diferença entre os MSEs das Curvas de Decaimento, infere-se que a resposta obtida pelo método com reflexões difusas possui decaimento mais próximo (mas ainda distante) daquele obtido pela Resposta ao Impulso analítica do que a resposta obtida pelo método sem reflexões difusas, apesar de esta se aproximar melhor energeticamente da resposta analítica. Além disso, houve aumento do T20 e diminuição da Definição, ainda que de pequena intensidade, no método das Fonte Virtuais Híbrido com reflexões difusas em relação ao sem reflexões difusas. Isso também demonstra que a energia no primeiro é mais distribuída.

**Tabela 6 – Parâmetros acústicos e MSE relativos às Resposta ao Impulso obtidas analiticamente e pelo método das Fontes Virtuais Híbrido com e sem reflexões difusas.**

	Analítica	Fontes Virtuais híbrido	Fontes Virtuais híbrido com Reflexões Difusas
MSE RIR (proporcional à energia)	-	0,1067	0,1185
MSE Decaimento (dB)	-	176,2119	163,6498
EDT (s)	1,254	0,286	0,286
T20 (s)	0,978	0,1675	0,183
Definição	0,5339	0,8065	0,7999

## 5. CONCLUSÕES

Com as implementações descritas nesse trabalho objetivou-se simular o maior número de modelos possível, como a variação de uniformidade da fonte e as reflexões difusas no método das Fontes Virtuais Híbrido.

Com a variação da uniformidade da fonte não se obteve melhora conclusiva nas Resposta ao Impulso obtidas, tanto no método do Traçado de Raios quanto no método das Fontes Virtuais Híbrido. Mais avaliações e simulações devem ser realizadas para que conclusões mais claras possam ser tomadas. A implementação de não-uniformidades mais concentradas em uma parte da superfície da fonte, direcionando mais o som por ela emitido, podem ser um próximo passo a ser dado para uma análise mais detalhada do efeito desse modelo das Respostas ao Impulso obtidas pelos métodos de acústica geométrica aqui implementados.

Com as reflexões difusas no método das Fontes Virtuais Híbrido obteve-se uma variação significativa na Resposta ao Impulso em relação ao mesmo método com as reflexões totalmente especulares. Por se tratar de apenas uma implementação desse tipo de reflexão, não podem ser tiradas conclusões definitivas sobre o efeito desse modelo sobre o resultado do método. Para isso, estudos mais aprofundados com diferentes parâmetros de  $p$ ,  $n$  e  $d$ , além de diferentes posições de fonte e receptor e salas com geometrias e características variadas devem ser realizados.

De modo geral, a implementação de ambos os métodos se mostrou satisfatória, com o método do Traçado de Raios apresentando bons resultados e o método das Fontes Virtuais Híbrido mostrando que precisaria de fontes virtuais de maior ordem para um melhor desempenho. Ambientes não tão reverberantes como o estudado devem ser considerados para análises futuras que possam obter conclusões mais gerais. Além disso, devido ao fato de as implementações serem realizadas em MATLAB, uma linguagem de alto nível, os tempos de processamento foram relativamente altos em relação ao que se espera de programas comerciais.

Uma representação sonora dos resultados obtidos não foi desenvolvida nesse trabalho, mas é possível por meio da auralização [5], que pode ser considerada como um próximo passo a ser dado com os resultados obtidos nesse trabalho. Com as Respostas ao Impulso obtidas por cada método poderiam ser gerados sinais

sonoros (em um ou dois canais) cuja qualidade poderia ser avaliada por meio de testes psicoacústicos.

Concluindo, o objetivo geral do trabalho foi atingido com a implementação satisfatória de um programa em MATLAB para a simulação da Resposta ao Impulso de salas com base no método híbrido entre o Traçado de Raios e as Fontes Virtuais.

## REFERÊNCIAS

- [1] EDERER, Dr.-Ing. H. J. **Vorlesung Raumakustik und Beschallungstechnik.** *Technische Universität Dresden*, Institut für Bauklimatik, Skript-Nr. 41, Semestre de Verão 2015;
- [2] SAVIOJA, L.; SVENSSON, U. P. **Overview of geometrical room acoustic modeling techniques.** *In: The Journal of the Acoustical Society of America.* Nr. 138(2), p. 708-730, Agosto, 2015;
- [3] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY: Department of Mechanical Engineering. Analysis and Design of Feedback Control Systems: **The Dirac Delta Function and Convolution.** Disponível em: <http://web.mit.edu/2.14/www/Handouts/Convolution.pdf>;
- [4] NOVAK, A.; RUND, F.; HONZIK, P. **Impulse Response Measurements Using MLS Technique on Nonsynchronous Devices.** *In: Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 64, No. 12, Dezembro 2016;
- [5] GOMES, M. H. A.; BERTOLI, S. R.; DEDECCA, J. G. **Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas.** *In: Revista da Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC)*, 2007;
- [6] KULOWSKI, A. **Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique.** *In: Applied Acoustics Vol. 18 (6)*, p. 449-469, 1984;
- [7] DANCE, S. M.; SHIELD, B. M. **The Complete Image-Source Method for the Prediction of Sound Distribution in Non-diffuse Enclosed Spaces.** *In: Journal of Sound and Vibration.* Vol. 201 (4), p. 473-489, Abril, 1997;
- [8] FARINA, A. **RAMSETE – A New Pyramid Tracer for Medium and Large Scale Acoustic Problems.** *Proc. of Euro-Noise, Vol. 95*, França, 1995;
- [9] KRUZINS, E.; FRICKE, F. **The Prediction of Sound Fields in Non-diffuse Spaces by a ‘Random Walk’ Approach.** *In: Journal of Sound and Vibration.* Vol. 81(4), p.549-564, Abril, 1992;
- [10] LAM, Y. W. **A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models.** *In: The Journal of the Acoustical Society of America*, Nr. 100(4), p. 2181–2192, 1996;
- [11] VORLÄNDER, M. **Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm.** *In: The Journal of the Acoustical Society of America*, Nr. 86(1), p. 172-178, Julho, 1989;
- [12] TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S. **Método híbrido para a simulação numérica da acústica de salas: Teoria, Implantação computacional e Validação experimental.** *In: I Seminário de Música, Ciência e Tecnologia*, Instituto de Matemática e Estatística da USP, 2004;

- [13] EATON, J. *et al.* **Estimation of Room Acoustics Parameters: The ACE Challenge.** In: *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, Vol. 24, No.10, Outubro, 2016;
- [14] LENTZ, T. *et al.* **Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction.** In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Artigo 70540, 2007;
- [15] LEWERS, T. **A Combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics.** In: *Applied Acoustics Vol. 38 (2-4)*, p. 161-178, 1993;
- [16] TENENBAUM, R. A. *et al.* **Hybrid Method for Numerical Simulation of Room Acoustics with Auralization: Part 1 – Theoretical and Numerical Aspects.** In: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 29 (2), Rio de Janeiro, 2007;
- [17] ALLEN, J. B.; BERKLEY, D. A. **Image Method for efficiently simulating small-room acoustics.** In: *The Journal of the Acoustic Society of America*, Nr. 65, p. 943-950, 1979.
- [18] Gracey & Associates. **Acoustic Glossary.** Disponível em: <http://www.acoustic-glossary.co.uk/>.
- [19] Kuttruff, H. **Room Acoustics.** 5<sup>a</sup> Ed. Abingdon: Spon Press, 2009.