

ANA PAULA FREITAS VILELA BOAVENTURA

**MODELAGEM ACÚSTICA DE SALAS ATRAVÉS DA
TÉCNICA DE MALHAS DE GUIAS DIGITAIS DE
ONDAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

ANA PAULA FREITAS VILELA BOAVENTURA

**MODELAGEM ACÚSTICA DE SALAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE
MALHAS DE GUIAS DIGITAIS DE ONDAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR(A) EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte.

Uberlândia – MG

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B622m Boaventura, Ana Paula Freitas Vilela, 1981-
2014 Modelagem acústica de salas através da técnica de malhas de
guias digitais de ondas/ Ana Paula Freitas Vilela Boaventura. - 2014.
204 f.: il.
Orientador: Dr. Marcus Antônio Viana Duarte.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Acústica arquitetônica - Teses.
I. Duarte, Marcus Antônio Viana. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

ANA PAULA FREITAS VILELA BOAVENTURA

MODELAGEM ACÚSTICA DE SALAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE MALHA DE GUIAS DIGITAIS DE ONDAS.

Tese _____ pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e
Vibrações.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte - UFU – Orientador

Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda - UFU

Prof. Dr. Francisco Paulo Lepore Neto – UFU

Prof. Dr. Newton Sure Soeiro – UFPA.

Prof. Dr. Renato Pavanello – Unicamp.

Uberlândia, 30 de Janeiro de 2014.

Aos meus filhos, Paulo e Carolina, amores da minha vida

Ao meu marido, Nery, minha alma gêmea.

Aos meus pais e minha irmã, os meus alicerces.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por iluminar o meu caminho...

Ao professor Duarte que com muita dedicação, paciência, disponibilidade e profissionalismo, me direcionou na construção desse trabalho. Desse período de orientação, muito além do título, levo um exemplo de sabedoria e humildade.

Ao professor Ricardo Fortes que muito me auxiliou, fornecendo a base teórica para o desenvolvimento do mesmo.

Ao professor Elias que por inúmeras vezes me atendeu para esclarecer dúvidas, além de disponibilizar o material bibliográfico referente à auralização de salas.

Ao meu esposo Nery, o meu mais especial agradecimento. Sempre ao meu lado, apoiando mesmo nos momentos em que precisei ficar ausente, por conta das atividades do doutorado. Nesse ponto, quero ressaltar a minha eterna gratidão por acompanhar os nossos filhos, Paulo e Carolina, para que esse sonho se tornasse real.

Aos meus pequenos, que praticamente cresceram dividindo às atenções da mãe com a tese. Muito obrigada pelo simples fato de vocês existirem e transformarem a minha vida em algo muito melhor: - Eu amo vocês!

À minha mãe, Vilzenir, e à Ana Amélia, minha irmã, que me acompanham desde o começo: confiando, me encorajando e incentivando nas inúmeras vezes que foi preciso. Ao meu já falecido pai, Paulo, que mesmo com um tempo de convivência muito curto, me mostrou bons exemplos, os quais cultivo e oriento os meus caminhos.

Ao meu padasto, Antônio Carlos e aos meus sogros, Vera e Osório, sem deixar de mencionar meus cunhados, que muito me ajudaram, principalmente no que diz respeito a cuidar dos meus filhos durante esse tempo.

Aos primos Bethânia, Bruno, João Antônio e Pollyana e ao meu cunhado Alan, por me bem receberem quando foi preciso e ao Leandro pela correção do trabalho.

Aos amigos do LAV (Laboratório de Acústica e Vibrações), em especial à minha amiga Marcela, cujas conversas a respeito de acústica sob o ponto de vista arquitetônico foram imprescindíveis para o enriquecimento deste trabalho e ao Japonês que ainda no início da pós-graduação, me auxiliou com as discussões iniciais sobre propagação sonoras.

Aos colegas do departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Goiás – Campus Jataí, pelo companheirismo de sempre. Em especial, gostaria de agradecer à minha amiga Ana Carolina, parceira de todas as horas.

Por fim, sinceros agradecimentos à Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes pelo apoio financeiro.

BOAVENTURA, A.P.F.V. **Modelagem Acústica de Salas Através da Técnica de Malha de Guias Digitais de Ondas**. 2014. 205 f. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A modelagem de ambientes reverberantes por meio de técnicas baseadas na geometria, como o *Ray Tracing* ou na propagação de ondas acústica, como Elementos Finitos são consagrados respectivamente para recintos de grande e pequeno porte. Porém, a grande dificuldade reside na simulação dos recintos médios, em função da precisão, para a abordagem geométrica, e do custo computacional, para os baseados no comportamento da onda. Assim sendo, o objetivo deste trabalho consiste na obtenção da Resposta Impulsiva da Sala (*Room Impulse Response* – RIR) em ambientes de médio porte por meio da técnica de Malhas de Guias Digitais de Ondas (*Digital Waveguide Mesh* – DWG). Durante as simulações a excitação se deu por meio de um meio seno, representando uma aproximação do Delta de Dirac. Para simular o campo reverberante, foram exploradas diferentes geometrias de malhas. Aplicando os resultados obtidos numericamente foi possível prever o comportamento sonoro de uma amostra de áudio sendo reproduzida no mesmo, por meio da auralização. Somado a isso, certos parâmetros da qualidade acústica, que são diretamente derivados da RIR puderam ser calculados. Para finalizar, um estudo comparativo das RIR obtidas experimentalmente, teoricamente e via DWG foi realizado. A partir da proposta inicial do trabalho, chegou-se a uma ferramenta computacional capaz de prever o comportamento acústico em ambientes bi e tridimensionais, num tempo computacional, relativamente baixo e com qualidade em seus resultados. Por conseguinte, foi possível fazer uma análise prévia da qualidade acústica da sala, inclusive permitindo ouvir o som reproduzido no recinto virtual.

Palavras Chaves: Auralização, Malhas de Guias Digitais de Ondas, Binaural Impulse Response, Qualidade Acústica e Delta de Dirac.

BOAVENTURA, A.P.F.V. **Acoustic Room Modelling Using a Digital Waveguide Mesh Technique**. 2014.205 p. PHD Tesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The modeling of reverberant environments using techniques based on geometry, such as Ray Tracing or behavior-based wave, such as Finite Elements are devoted respectively to large and small places . But the great difficulty arises in the simulation of medium enclosures, based on precision to the geometrical approach and the computational cost for the behavior-based wave. Therefore, the objective of this work is to obtain Impulse Response Room (Room Impulse Response - RIR) in midsize through technical Digital Waveguide Mesh (Digital Waveguide Mesh - DWG) environments . During the simulations the excitation was made by a half-sine, representing an approximation of the Dirac Delta. To simulate the reverberant field, were explored different geometries of meshes. Applying the results obtained it was possible to predict numerically the acoustic behavior of a sample of the same audio playing through the auralization. Added to this, certain parameters of acoustic quality which are directly derived from the RIR could be calculated . Finally, a comparative study of the RIR obtained experimentally , theoretically and via DWG was performed . From the initial proposal of the work , we have reached a computational tool able to predict the acoustic behavior in two and three dimensional environments , a relatively low computational time and quality in their results . Therefore , it was possible to make a preliminary analysis of the acoustic quality of the room , including allowing the sound reproduced in the virtual room.

Key Words: Auralization, Digital Waveguide Mesh, Binaural Impulse Response, Acoustic Quality and Dirac Delta.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Som com comprimento de ondas maior do que o obstáculo.	333
Figura 2.2 - Obstáculos com dimensões maiores que o comprimento de onda introduz uma sombra.....	34
Figura 2.3 - Grande abertura em relação ao comprimento de onda. As ondas atravessam, mas a difração introduz som na sombra, indicadas pelas setas.....	34
Figura 2.4 - Abertura pequena em relação ao comprimento de onda opera como uma nova fonte pontual de onde se originam fontes esféricas resultantes da difração.....	34
Figura 2.5 - Reflexão, absorção e transmissão de uma onda plana.....	36
Figura 2.6: Parâmetros a serem avaliados na propagação sonora ao ar livre.....	39
Figura 2.7: Propagação do som em recinto fechado com a caracterização do campo direto e indireto.....	40
Figura 2.8: Curva de decaimento de energia com relação ao tempo, Resposta Impulsiva da Sala. Figura modificada de (Vorlander, 2008).....	43
Figura 2.9: Tempo ótimo de reverberação, modificada de Gerges, 2000.....	46
Figura 2.10: Fluxograma para o uso da técnica de acústica previsional, figura modificada de (Andrade, Slama e Azevedo, 2004).....	54
Figura 2.11: Representação do modelo em escala da Sydney Opera House. Figura retirada Rindel e Christensen, (2009).....	56
Figura 2.12: Subdivisão sobre um dos triângulos originais do isocaedro. Disponível em (Tenenbaum e Camilo, 2004)	58
Figura 2.13: Reflexão especular (Figura modificada de Tenenbaum e Camilo, 2004).....	59
Figura 2.14: Traçado de um raio acústico da fonte ao volume receptor. Modificado de (Raynoise, 1993).....	59
Figura 2.15: Caminho da reflexão de primeira ordem num caso bi-dimensional.....	61
Figura 2.16: Fonte Imagem de terceira ordem e o correspondente caminho de reflexão. Imagem modificada de Raynoise, 1993).....	62
Figura 2.17: Discretização do volume do ambiente com uma fonte e um receptor representados hipoteticamente no recinto, para serem simulados através do Método de Elementos Finitos.....	64

Figura 2.18: Discretização da superfície do ambiente conforme a metodologia BEM	65
Figura 3.1.:Etapas da auralização de salas. Cadeia de auralização: modelagem da fonte-meio-receptor para auralização. Figura modificada de (Savioja e Lokki, 2002).....	75
Figura 3.2: Representação da recepção binaural.....	77
Figura 3.3: Fontes sonoras impulsivas (Figura obtida em Farina, 2007)	80
Figura 3.4: Obtenção de RIR por <i>Ray Tracing</i> .: E – Emissor; R – Receptor; r_r – Raio da zona de recepção.	82
Figura 3.5– Representação da malha do tipo quadrada das Malhas de Guias Digitais de Ondas, usada para a simulação de salas acústicas.....	82
Figura 3.6;. Configuração do ambiente de teste, figura obtida em (Southern, Siltanen e Lauri., 2011)	83
Figura 3.7: Representação hipotética do sinal emitido pela fonte.....	84
Figura 3.8: Etapas para obtenção e tratamento da BRIR.....	86
Figura 3.9: Representação auralização inteiramente computacional, figura obtida em (Fernandes Júnior, 2005).....	88
Figura 4.1 – Representação de uma Guia Digital de Onda.	93
Figura 4. 2 – Digital Waveguide. Figura modificada de Van Duyne e SmithIII (1993).....	95
Figura 4.3 – Junta de dispersão genérica com N guias digitais de ondas interconectadas, sendo $i=1, 2, \dots, N$. Os sinais '+' e '-' correspondem as componentes de ondas viajantes para dentro e para fora da junção, representada pelo círculo central. Figura modificada de (Campos, 2003)	97
Figura 4. 4 – Junta de dispersão conectada a N vizinhos por unidades de atraso bi-direcionais. Figura modificada de Savioja et al, (1995).	99
Figura 4.5 – Fluxograma do algoritmo básico da simulação da Malha de Guia Digital de Onda. Figura modificada de (Van Duyne & Smithiii, 1993).	100
Figura 4.6 – Representação do erro causado pela discretização na modelagem da condição de contorno. Os limites reais do domínio modelado e a aproximação correspondente são representados respectivamente, pelas linhas contínuas e pelas linhas pontilhadas. Pontos brancos: nós que representam o meio de propagação, no caso, o ar. Pontos riscados: nós do contorno. Pontos pretos: nós inativos.	103
Figura 4.7 – Representação da junta de dispersão representando uma descontinuidade na impedância.	103
Figura 4.8 – Perda na guia de onda Digital. Adaptação de Smith (1992).	105
Figura 4.9 – Absorção sonora do ar com relação da distância e a frequência. Figura obtida em Savioja (2000).....	105

Figura 4.10 – Representação da fonte sonora na Malha triangular e bidimensional de Guias Digitais de Ondas.	106
Figura 4.11 – Sinal senoidal no tempo típico aplicado na fonte sonora. A figura 4.11 A representa um sinal de baixa frequência, responsável por emitir os sons grave e na Fig. 4.11 B representa um sinal de alta frequência, responsável por produzir os sons agudos.....	107
Figura 4.12 – Evolução temporal da propagação sonora numa malha SWG de guias digitais de ondas.....	108
Figura 4.13 – Representação genérica de Guias Digitais de Ondas para formarem uma malha quadrada.....	109
Figura 4.14 – Representação genérica de uma Malha Quadrada - SWG. Figura modificada de (Campos G. , 2003).	109
Figura 4.15 – Representação esquemática das Juntas de Dispersão na malha SWG. As porções P_J^+ e P_J^- representam respectivamente as porções de entrada e saída na junta J, em direção a junta 2 (posicionada ao Norte). Figura modificada de Moura (2005).....	111
Figura 4.16 – Representação matricial da malha numérica quadrada.....	112
Figura 4.17 – Representação genérica de Guias Digitais de Ondas para formarem uma malha triangular.	113
Figura 4.18 – Representação genérica de uma Malha Triangular - TWG. Figura modificada de Campos, (2005)	114
Figura 4.19 – Representação esquemática das Juntas de Dispersão na malha TWG. As porções p_J^+ e p_J^- representam respectivamente as porções de entrada e saída na junta J, em direção a junta 2 (posicionada na região Norte).....	114
Figura 4.20 – Representação matricial da malha TWG.....	116
Figura 4.21 – Representação esquemática da malha cúbica 3D no canto esquerdo. No lado direito, está representada a unidade de célula dessa geometria, sendo que a distância entre os nós é expressa por d. Essa célula é caracterizada por três unidades de atraso bidirecional ao longo dos eixos x, y e z.	118
Figura 4.22 – Representação esquemática das Juntas de Dispersão na malha CWG.....	118
Figura 4. 23 – Representação da malha numérica cúbica.	120
Figura 4.24 – Representação esquemática da malha tetraédrica, 3D.	121
Figura 4. 25 – (A) Geometria da Malha Tridimensional Tetraédrica e (B) vista do plano da malha. (C) vista frontal da malha, figura obtida em Romeiro, (2011).....	121
Figura 4.26 – Eixos de propagação da malha.	122
Figura 4. 27 – Unidade de célula da Malha tetraédrica, figura obtida em (Campos, 2008).	122

Figura 4.28 – Malha tridimensional tetrédrica formada pelo arranjo das unidades de células.	123
Figura 4.29 – Posição relativa dos seis vizinhos da unidade de célula.	124
Figura 4. 30 – Representação da restrição da Malha SWG, sendo os pontos pequenos que recebem as setas, as juntas de dispersão	125
Figura 4.31 – Representação esquemática das direções de propagação das ondas na malhas SWG e TWG, respectivamente A e B. As retas pontilhadas indicam as direções preferenciais de propagação. Figura modificada de Moura (2005).	126
Figura 4.32 – Representação do erro de dispersão na malha cúbica e da tetraédrica. Figura Modificada de (Hacihabiboglu, Gunel e Cvetkovic, 2010)	127
Figura 5.1 – Representação esquemática da sala usada para calcular a RIR através da SWG e do elemento <i>Acoustic</i> 29 com malha quadrada do pacote comercial Ansys®.	129
Figura 5.2 – Simulação da resposta impulsiva usando Guias Digitais de Ondas (A) e métodos de Elementos Finitos (B)	130
Figura 5.3 – Momento em que a fonte é desligada. (A) representação da SWG e (B) resultado em Elementos Finitos.	130
Figura 5.4 – Medição da resposta impulsiva na posição da fonte (A) para o caso de Malhas de Guias Digitais de Ondas e (b) representa o método de Elementos Finitos.	130
Figura 5.5 – Medição da resposta impulsiva no receptor. (A) para o caso de Malhas de Guias Digitais de Ondas e (B) representa o Método de Elementos Finitos.	130
Figura 5.6 – Tempo de reverberação no receptor. (A) para o caso de Malhas de Guias Digitais de Ondas e (B) representa o Método de Elementos Finitos.	130
Figura 5.7 – Medição da resposta impulsiva na posição no receptor.	131
Figura 5.8– Representação da sala usada para simulação da malha SWG.	136
Figura 5.9 – Sinal de diferentes sinais RIR num dos pontos receptores.	138
Figura 5.10 – Representação do sinal nas três bandas de frequência já filtradas através do filtro do tipo butterworth.	139
Figura 5.11 – Somatório dos sinais referente às seis bandas já filtradas.	139
Figura 5.12 – Sinal Original e convoluído, respectivamente.	140
Figura 5.13 – Representação física do ambiente usado para simulação usando TWG.	141
Figura 5.14 – Tempo em que o sistema em repouso é excitado pelo funcionamento da fonte, tempo em que a imagem foi adquirida $t=1.2207e-004s$	142
Figura 5.15 – Momento em que a onda atinge os obstáculos, que simulam os casos de paredes. $T=0.0023s$	143

Figura 5.16: Momento em que a onda interage com o obstáculo central da sala, tempo 0.0092s.....	143
Figura 5.17 – Momento em que o obstáculo é atingido pela energia sonora através das reflexões das ondas, bem como a parcela de energia que foi transmitida através do obstáculo. $t = 0.0122s$	144
Figura 5.18 – Representação do sinal original, auralizado na posição da fonte e por último auralizado no receptor.	145
Figura 5.19 – Representação do problema físico tridimensional.	146
Figura 5.20 – Resposta Impulsiva obtida no ponto da fonte.....	147
Figura 5.21 – Composição do sinal no receptor	147
Figura 5.22 – Composição do sinal no receptor filtrado	148
Figura 5.23: Representação do sinal original, auralizado na posição da fonte e por último auralizado no receptor.	148
Figura 6.1 – Representação esquemática da sala utilizada para a análise experimental ...	152
Figura 6.2 – Sinal emitido pela fonte no procedimento experimental e virtual	152
Figura 6.3 -:Sinal emitido pela fonte no procedimento experimental e virtual.	154
Figura 6.4 – Representação da fonte utilizada para excitar o sistema experimental, que consiste no notebook executando o meio seno e a caixa de som.....	154
Figura 6.5– Representação do sistema de aquisição de dados que consiste no par de receptores indicados na figura por Microfone A e Microfone B, placa de aquisição NI-BNC-2120 e o notebook.	155
Figura 6.6 – Sinal captado nos sensores A em azul e B em vermelho.....	156
Figura 6.7 – Sinal filtrado através do filtro <i>Butterworth</i> de sexta ordem.....	157
Figura 6.8 – Exemplo de um dos Sinais obtidos no experimento pelo microfone 1, filtrados em 1000 Hz e em escala logarítmica. O gráfico a direita traz um zoom do pico em destaque.	158
Figura 6.9 – Resposta ao impulso no domínio do tempo nos dois sensores A em vermelho e B em azul. Obtida via técnica de guias digitais de ondas.....	160
Figura 6.10 – Sinal filtrado através do filtro <i>butterworth</i> de sexta ordem.	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tempo de reverberação típicos.....	45
Tabela 3.1: Comparação da performance entre o conjunto de RIR gerado pela técnica de Raios Traçados e Modelos baseados na Propagação da Onda. O tempo é expresso como (horas:minutos). Tabela Obtida em (Southern, Siltanen, & Lauri., 2011).....	83
Tabela 5.1: Valores hipotéticos dos coeficientes de absorção dos obstáculos.....	137
Tabela 5.2 – Valores hipotéticos dos coeficientes de absorção dos obstáculos.....	142
Tabela 5.3. Valores hipotéticos dos coeficientes de absorção dos obstáculos.....	146
Tabela 5.4 – Tempo de Reverberação 60 [s] em bandas de frequência [Hz], obtido via técnica de Guias Digitais de Ondas.	161
Tabela 6.1: Coeficientes de Absorção (em %) dos materiais da sala de pesquisa com relação às bandas de frequências [Hz], Gerges (2000).	151
Tabela 6.2: Representação da Localização espacial da fonte sonora e dos sensores.	155
Tabela 6.3: Valores com intervalo de confiança de 95% obtidos para obter o TR_{60} para amostras obtidas experimentalmente.	158
Tabela 6.4: Tempo de Reverberação 60 [s] em bandas de frequência [Hz], estimado de acordo com a Equação de Sabine.	159
Tabela 6.5: Tempo de Reverberação 60 [s] em bandas de frequência [Hz], obtidos via Técnica de Guias Digitais de Ondas.	159
Tabela 6.6: Compilação dos Tempos de Reverberação 60, expressos em segundos obtidos via métodos: experimental, teórico e numérico, respectivamente.	162
Tabela 6.7: EDT obtidos via técnica de Guias Digitais de Ondas.....	163

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

a: Aceleração.

A: Amplitude do sinal.

AB: Superfície de separação entre dois meios.

BR_{pref} : Razão de baixo preferencial.

C: Clareza.

c: Velocidade de propagação do meio.

c_1 : Velocidade de propagação no meio 1.

c_2 : Velocidade de propagação no meio 2.

c_n : Velocidade de propagação nominal da onda.

d: Distância internodal.

d_i : Coeficiente de difusidade.

D: Definição.

E: Emissor.

$F(s)$: Transformada de Laplace de uma função arbitrária.

$f(x)$: Função arbitrária.

f: Frequência do sinal.

F: Força.

$F_1, F_2, \dots, F_N$: Forças que atuam numa mola.

$f_{aquisição}$: Frequência de aquisição do sinal.

f_L : Maior frequência do sinal.

f_i : Função arbitrária.

f_s : Frequência de atualização da malha.

$f_{Schroeder}$: Frequência de Schroeder.

$(G_{mid})_{pref}$: Força média preferencial nas médias frequências.

$G(s)$: Transformada de Laplace da função arbitrária.

$g(x+ct)$: Função arbitrária qualquer que relaciona o deslocamento a velocidade de propagação e o tempo.

G: fator de força.

g: função arbitrária.

$G_{i,500}$: Valor do fator de força em 500 Hz na i -ésima posição.

g_i : Função arbitrária.

g_m : Fator de perda de energia do sistema.

G_{mid} : Força nas medias frequências.

$h(t)$: Resposta de um sistema a uma excitação do tipo Delta de Dirac.

$h(x-ct)$: Função arbitrária qualquer que relaciona o deslocamento a velocidade de propagação e o tempo.

$H(\omega)$: Função da resposta em frequência.

H1: Canal auditivo esquerdo.

H2: Canal auditivo direito.

i : i -ésimo elemento.

J: Representação de uma junta de dispersão.

L_f : Fração de energia literal.

L_p : Nível de pressão sonora no ponto receptor.

L_w : Nível de potência sonora.

m : Massa.

n : N -ésimo elemento.

N : Número de vizinhos.

N_{pos} : Número total de posições do receptor.

$NPS_{LT\ CR}$: nível linear total de pressão com influência de reflexões sonoras, [dB].

$NPS_{LT\ SR}$: Nível linear total de pressão sonora sem influência de reflexões sonoras

$P(t)$: Variação temporal da pressão sonora rms num local do ambiente.

P : Pressão acústica.

$\bar{p}$: pressão sonora refletida

$p^+(n)$: Pressão sonora que está incidida sobre o nó.

p_i^+ : Pressão sonora que alcança a junção i e que partiu do lado oposto da guia.

p_i^+ : Pressão sonora que alcança a junção i e que partiu do lado oposto da guia.

$p_{ii}^+(n)$: Pressão sonora que alcança a junção j proveniente do nó i .

P_0 : Pressão estática

P_1 : Pressão no meio 1.

P_2 : Pressão no meio 2.

$\bar{p}_i$: Pressão sonora que sai da junção i e que alcançará o lado oposto da guia.

$\bar{p}_{ij}(n)$: Pressão sonora que sai da junção i em direção ao nó j .

$p_L(t)$: Pressão sonora capturada na orelha direita.

$p_R(t)$: Pressão sonora capturada na orelha esquerda.

p^{tr} : Pressão sonora refletida.

Q_θ : fator de diretividade da fonte na direção θ .

r : coeficiente de reflexão.

R : impedância.

r_1 : receptores 1.

r_2 : receptores 2.

r_a : Distância de 10m entre a fonte sonora e o receptor.

R_c : Receptor.

r_L : tempo usado na transformada de Laplace.

r_r – Raio da zona de recepção.

r_{ref} : Distância de 1 m tomada como referência.

S : Área interna da superfície da sala;

Sc : Fonte esférica num determinado ponto.

Sc_1 : Fonte virtual de primeira ordem projetada na parede 1.

Sc_{12} : fonte virtual de segunda ordem projetada nas paredes 1 e 2, respectivamente.

Sc_{124} : Fonte virtual de terceira ordem projetada nas paredes 1, 2 e 4, respectivamente.

Sc_2 : Fonte virtual de primeira ordem projetada na parede 2

Sc_3 : Fonte virtual de primeira ordem projetada na parede 3

Sc_4 : Fonte virtual de primeira ordem projetada na parede 4

S_i : l-ésimas áreas que compõem a superfície total da sala;

s_i : Área de superfície interna.

$SP(r)$: Nível de pressão sonora.

S_{cubo} : altura lateral do Cubo.

t : Variável temporal.

T : Tempo.

t_0 : Tempo inicial.

t_1 : Tempo inicial usado para calcular a clareza.

t_2 : Tempo final usado para calcular a clareza.

$t_{AtrasoInicial}$: Tempo de atraso inicial.

t_n : T-ésimo tempo.

T_s : Tempo central.

u : Tamanho da borda da unidade de célula.

$u(x,t)$: Função arbitrária que relaciona o tempo e o espaço.

$u(t-r_L)$: Função degrau unitário.

$u^+(n)$: Componente viajante da onda que viaja no sentido positivo do eixo cartesiano x

$u^-(n)$: Componente viajante da onda que viaja no sentido negativo do eixo cartesiano x

v : Velocidade da partícula refletida.

v : Velocidade da partícula.

V : Volume da sala.

v^+ : Velocidade da partícula incidente.

$V_1, V_2, \dots, V_{2N}$: Velocidade das molas

v_i : Velocidade num determinado ponto.

$Vr1$: Vetor do eixo x usado para a malha quadrada.

$Vr2$: Vetor do eixo y usado para a malha quadrada.

v^{tr} : Velocidade da partícula transmitida.

$x(t)$: Sinal de entrada.

$X(\omega)$: Transformada de Fourier no domínio da frequência e entrada do sistema SLIT.

x : Coordenada do eixo x .

X : Distância percorrida pela onda num intervalo de tempo T .

$X2$: Parâmetro usado para calcular o intervalo de atraso inicial.

X_d : Distância entre a fonte o receptor na trajetória indireta.

X_i : Distância entre a fonte e receptor na trajetória direta.

$\overline{x_{RMS}^2}$: Média do quadrado do valor RMS.

$Y(\omega)$: Saída do sistema SLIT no domínio da frequência.

y : Coordenadas do eixo y

y_{tt} : Representa a variação da pressão, com relação ao tempo t , equivale a derivada segunda

y_{xx} : Variação da pressão com relação ao espaço, x , equivale a derivada segunda.

z : Função transferência.

Z : Impedância acústica específica do meio.

Z_0 : Impedância das ondas planas.

Z_1 : impedância do meio 1.

Z_2 : Impedância do meio 2.

Z_t : Função transferência.

Letras Gregas

$\overline{\alpha}$ é o coeficiente de absorção médio

α_i coeficiente de absorção de cada área.

α_{malha} : ângulo entre as guias digitais usadas para formar a malha tetraédrica

γ : constante relacionada ao calor específico.

$\delta(t)$: Delta de Dirac

Δt : variação de tempo

Δx : variação de espaço

ε : Tempo infinitesimal

ε_{IACC} : correlação da percepção subjetiva do envolvimento pelo som

$\varepsilon_x(t, x)$: Deslçamento longitudinal da partícula.

η : coeficiente de reflexão

θ : ângulo de reflexão

θ : direção

$\vec{v}$: velocidade do fluido

ρ : densidade do meio

ρ : densidade instantânea do gás.

ρ_0 : densidade médias do gás (sem distúrbio).

ρ_{IACC} percepção subjetiva da largura da fonte sonora

τ : coeficiente de transmissão

τ_{IAC} : tempo usado na função que calcula o coeficiente de correlação cruzada interaural.

φ : quantidade mensurável qualquer

ω : frequência

Abreviaturas

BEM: *Boundary Element Method*.

BR: Razão de Baixo.

CCRMA: *Center for Computer Reserch in Music and Acoustics*.

CWG: *Cubic Waveguide Mesh*.

DWG: *Digital Waveguide]*

EDP Equação Diferencial Parcial.

EDT: Tempo de Decaimento Inicial.

FDTD: *Finite Difference Time Domain.*

FEM: *Finite Element Method.*

FFT: *Fast Fourier Transform.*

FHT: *Fast Hadamard Transform.*

FIR: *Finite Impulse Response.*

FRF: *Função da Resposta em Frequência.*

HRTF: *Head Related Transfer Function.*

IACC: *inter-aural cross correlationcoefficiente correlação cruzada interaural*

IACC_{e(early)}: *Inter-aural cross correlationcoe early*

IACC_{L(ate)}: *Inter-aural cross correlationcoefficiente late*

IACF: *Inter-aural cross correlation function*

IACF: *Interaural cross correlation function*

IDE: *Integrated Development Environment.*

IIR: *Infinite Impulse Response.*

ILD: *Interaural Level Difference.*

IR: *Impulse Response.*

ISO: *International Standard Organization*

ITF: *Interaural Time Difference.*

LEV: *Listener Envelopment.*

MLS: *Maximum Length Sequence.*

NPS: *Nível de Pressão Sonora.*

NWS: *Nível de Potência Sonora.*

RIR: *Room Impulse Response.*

RMS: *Root Mean Squared.*

TR : *Tempo de Reverberação*

RT₆₀: *Tempo de reverberação requerido para que o nível de pressão sonora decaia 60dB.*

SDI: *Índice de Difusão Sonora*

SDI_{pref}: *Índice de Difusão Preferencial*

SLIT: *Sistemas Lineares Invariantes no Tempo*

SWG: *Squared Waveguide.*

TWG: *Triangular Waveguide Mesh.*

TWM: *Tetrahedral Waveguide Mesh.*

Unidades de Medida e Escala

*: *convolução.*

-: componentes de ondas viajantes para fora da junção.

+: componentes de ondas viajantes no sentido da junção.

2D: Bidimensional.

dB: decibel.

Hz: Hertz.

Kg: unidade de massa.

KHz: Kilo hertz.

m:metro

m^2 :unidade de grandeza da aceleração.

ms: milissegundo.

N: Newton (Grandeza de força).

Rayls: unidade de grandeza da impedância.

s: segundos.

SUMÁRIO

Introdução	26
1.1. Contexto do Trabalho	26
1.2. Objetivos Gerais.....	28
1.3. Objetivos Específicos	29
1.4. Organização dos Capítulos	29
Fundamentação Teórica.....	31
2.1. Princípios da Propagação Sonora	31
2.1.1 – Interações das Ondas com Obstáculos.....	33
2.1.2 – Cálculo dos Coeficientes de Reflexão e Transmissão.....	36
2.1.3 – Propagação em Ambientes Fechados	39
2.2. Acústica de Salas.....	41
2.2.1 – Critérios de Qualidade Acústica	41
2.3. Acústica Previsional	53
2.3.1 – Modelo em Escala	55
2.3.2 – Modelos Geométricos	57
2.3.3 – Modelos Teóricos.....	63
2.3.4 – Os Modelos Baseados no Comportamento da Onda Acústica	63
Auralização de Salas	69
3.1. Auralização	69
3.2 – Histórico	71
3.3 – Cadeia de Auralização de Salas.....	74
3.4 – Auralização Binaural.....	77
3.4.1 Cálculo da Resposta Impulsiva da Sala (RIR – Room Impulse Response)	78

3.4.2. Cálculo da Resposta Impulsiva Binaural (BRIR – Binaural Room Impulse Response)	84
3.4.3. Técnicas de Auralização Binaural	86
Malhas de Guias Digitais de Ondas	90
4.1 – Introdução	90
4.2 – Guias Digitais de Ondas	92
4.2.1 – Solução Discreta da Equação da Onda Usando Guias Digitais de Ondas	93
4.2.3 - <i>Juntas de Dispersão</i>	96
4.3 – Malhas de Guias Digitais de Ondas	99
4.3.1 – <i>Tratamento da Condição de Contorno na Malha de Guia Digital de Ondas</i>	102
4.3.2 – <i>Perda de Energia para o Meio</i>	104
4.3.3 – <i>Modelagem da Fonte e Propagação.</i>	106
4.4 Malha 2-Dimensional de Guias Digitais de Ondas	108
4.4.1 – <i>Malha Quadrada – Squared Waveguide (SWG)</i>	108
4.4.2 – <i>Malha Triangular – Triangular Waveguide (TWG)</i>	113
4.5 Malha 3-Dimensional de Guias Digitais de Ondas	117
4.5.1 – <i>Malha Cúbica – Cubic Waveguide (CWG)</i>	117
4.5.2 – <i>Malha Tetraédrica – Tetrahedral Waveguide Mesh (TWM)</i>	120
4.6 – Erro de Dispersão	124
Simulações	128
5.1 – DWG versus Elementos Finitos	128
5.2 – Geometrias de Malhas de DWG	135
5.2.1 – Malha Bidimensional SWG	136
5.2.2 – Malha Bidimensional TWG	141
5.2.3 – Malha Tridimensional Tetraédrica	145
Resultados Experimentais	150
6.1 – Introdução	150
6.1.1 – Descrição da Sala de Pesquisa	150

6.2 - Ensaio Experimental	152
6.3 – Modelo Teórico.....	159
6.4 – Simulação Numérica	159
6.5 - Análise e comparação dos resultados obtidos via ensaio experimental, modelo teórico e numérico.....	162
Conclusão e Trabalhos Futuros	164
7.1 – Trabalhos Futuros	166
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	169
ANEXO 1.....	184
APÊNDICE 1	184
APÊNDICE 2	203

CAPÍTULO I

Introdução

Este capítulo visa fazer uma breve explanação sobre o tema abordado no trabalho, bem como destacar os objetivos gerais e específicos, apontando as contribuições que as Malha de Guias Digitais de Ondas impelirão à modelagem acústica de salas. Ao final, apresenta-se a forma pela qual os demais capítulos estão organizados.

1.1. Contexto do Trabalho

O estudo em acústica desperta interesse nas mais diversas áreas do conhecimento, (BISTAFA, 2006), (BOREN, 2011). Os músicos, por exemplo, são preocupados com a qualidade do áudio gerado em determinado recinto, paralelamente, os profissionais da saúde investigam os impactos nocivos que o ruído pode causar no ser humano. Sob o ponto de vista da engenharia, o estudo se concentra nos conceitos físicos e matemáticos para descrever o comportamento do campo sonoro e nos efeitos da propagação sonora através do ambiente. (GERGES, 2000), (BRIGGS; OLEG, 2009). Computacionalmente, modelagens físicas para a síntese sonora permitem as simulações do comportamento sonoro de ambientes diferenciados, bem como instrumentos musicais, (MIGNOR; HELIE; MATIGNON, 2010).

A importância da acústica na vida do ser humano advém do fato de que essa trata, no escopo de seus assuntos, das interações do som com o ambiente no qual o

homem o percebe, (FERNANDES JÚNIOR, 2005). Fisicamente, é possível constatar a forte influência que o ambiente exerce em algumas atividades humanas corriqueiras, como a fala e a música, (BERANEK; MELLOW, 2012). Além disso, ambientes de trabalho, tais como as indústrias, se caracterizam por serem altamente ruidosos, propiciando insalubridade aos seus colaboradores, bem como para a população circunvizinha.

O tratamento adequado dos recintos supracitados é fruto de uma árdua tarefa, fazendo-se necessário o levantamento de uma série de considerações sobre a geometria, materiais de propagação e características da fonte, aumentando significativamente a quantidade de cálculos, (MOURA, 2005), (BERANEK; MELLOW, 2012). Nesse sentido, ferramentas capazes de prever o comportamento sonoro de um determinado ambiente e de como esse será percebido pelo sistema auditivo se mostram muito atraentes para projetos acústicos.

Atualmente, o emprego de técnicas previsionais para a medição do campo sonoro de propagação em meios abertos e fechados têm sido uma constante. No entanto, procura-se direcionar este trabalho para a propagação em ambientes fechados, que são caracterizados pela energia sonora proveniente da fonte bem como das reflexões das ondas sonoras pelos obstáculos inseridos na análise.

Uma das alternativas para abordar este problema está na utilização de modelos analíticos, porém para essa abordagem é necessário fazer muitas limitações, prejudicando na descrição precisa do modelo real. No caso de medições diretas, exige-se que o ambiente analisado exista fisicamente, inviabilizando o seu emprego de forma generalizada.

Nesse contexto, os métodos numéricos emergem no sentido de contribuir como uma alternativa vastamente aplicada na pesquisa, projeto e desenvolvimento de soluções em engenharia, (CARVALHO, 2013). Uma das grandes dificuldades encontradas nesses casos, diz respeito ao elevado tempo de processamento computacional e é nesse sentido que esse trabalho visa contribuir ao empregar a Malha de Guias Digitais de Ondas (*Digital Waveguide – DWG*), que são baseadas na solução da equação da onda, para caracterizar o comportamento da sala, com ênfase no estudo da qualidade dos recintos, bem como no escopo de realidade virtual por meio da auralização.

A DWG foi utilizada inicialmente para a modelagem de instrumentos de corda, no início dos anos 90 com o consagrado artigo de Julius Smith, com a proposta da metodologia (SMITH, 1992). Porém devido à flexibilidade da mesma, pôde ser

explorada em trabalhos como para a simulação de problemas mais complexos (CAMPOS, 2002), (LOKKI;JUKKA, 2009), (SOUTHERN, SILTANEN;SAVIOJA, 2010), (ERKUT; MATTI, 2002), (FREESTON, 2009), (ROMIERIO, 2011), (EVANGELISTA; SCAVONE; WANDERLEY, 2009) e (SAVIOJA, 2000). Ao longo dos anos, diversos autores exploraram métodos que visavam diminuir o erro de dispersão (no qual a velocidade de propagação real difere da simulada, interferindo no posicionamento dos nós na malha) ou discretização, como em Savioja (1995), Murphy (2008), Campos (2003) e Moura (2005). Conforme constatado por Boaventura (2009), esse modelo não é aplicável a ambientes abertos e pode ser trabalhado em bandas de frequência diferenciadas, fato que motivou a análise de ambientes reverberantes reais.

Acredita-se que a pesquisa das Malhas de Guias Digitais de Ondas aplicadas como uma técnica previsional tenha um grande impacto na área de acústica de salas, especialmente na concepção de projetos em que certos quesitos de qualidade sejam estimados. Por consequência, contribuirá no processo de caracterização numérica de ambientes (de médio porte) reverberantes, pautada na precisão dos resultados e no custo computacional da mesma, permitindo inclusive gerar sinais carregados das características do local, em outras palavras, como se tivessem sido reproduzidos dentro do próprio recinto, por intermédio da auralização. A justificativa detalhada para a escolha do método pode ser encontrada ao longo desse trabalho.

1.2. Objetivos Gerais

Assim sendo, o objetivo geral desse trabalho está em apresentar os aspectos conceituais, investigar o potencial de aplicação das malhas de Guias Digitais de Ondas para simular a Resposta Impulsiva da Sala (*Room Impulse Responde – RIR*) em bandas de frequência diferenciada em função dos coeficientes de absorção. Utilizar diferentes geometrias de malhas para obter a RIR e a partir desses valores devidamente filtrados, calcular certos quesitos da qualidade acústica, bem como fazer a auralização e por fim, apresentar e validar os resultados obtidos.

1.3. Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos é possível elencar:

- O mapeamento acústico do ambiente (via técnica de Guias Digitais de Ondas – *Digital Waveguide (DWG)*), gerando o espaço, fonte e receptores virtuais através dos diferentes arranjos de malhas;
- A geração da Resposta Impulsiva da Sala e captação da Resposta Binaural Impulsiva da Sala (*Binaural Room Impulse Response – BRIR*) e o processamento dos sinais obtidos, para filtrar em bandas de frequência;
- Avaliação do Tempo de Reverberação do recinto virtual e validação dos resultados obtidos com cálculos teóricos e experimentais;
- Aplicação da Resposta Impulsiva obtida via DWG para calcular certos parâmetros da qualidade acústica de recintos;
- A auralização inteiramente computacional, através da convolução da BRIR com um sinal anecóico, obtendo um arquivo sonoro audível proveniente de uma fonte sonora arbitrária e interação a sala e obstáculos virtuais gerados pela técnica de Guias Digitais de Ondas.

Por conseguinte, a contribuição desse trabalho consiste em apresentar uma ferramenta mais precisa de simulação que seja capaz de estimar o desempenho acústico de salas virtuais. Espera-se que com o auxílio dessa ferramenta, os profissionais da acústica concebam ambientes previamente otimizados, sem apresentar surpresas desagradáveis durante seu uso futuro.

1.4. Organização dos Capítulos

Esse trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo esse o primeiro deles, com uma introdução sobre o assunto. O segundo capítulo abordará considerações conceituais sobre a acústica geral de salas, dando um enfoque nos quesitos físicos da propagação sonora, parâmetros usados para avaliar a qualidade de salas acústicas e técnicas de modelagem de sala, com ênfase na acústica previsional e as seus principais representantes no prognóstico dos níveis de pressão sonora de recintos fechados. Devido à relevância do tema, o terceiro capítulo fará um levantamento sobre o processo de auralização, destacando a auralização computacional, abordada nessa

pesquisa. Para isso, faz o estudo da cadeia de auralização abordando os principais elementos dessa análise, como geração da Resposta Impulsiva da Sala, captação da Resposta Impulsiva Binaural da Sala, tratamento dos sinais e reprodução. O quarto capítulo apresentará a técnica de Guias Digitais de Ondas, percorrendo seu princípio físico e formulação matemática, bem como a construção de malhas usadas para simular a propagação acústica bi e tridimensional. O quinto capítulo trará uma compilação dos resultados obtidos através das simulações, sendo que foi feito um comparativo entre as técnicas de Malhas de Guias Digitais de Ondas e Elementos Finitos, além de explorar diferentes geometrias de malhas e a propagação com barreiras. Nesse capítulo também são feitos experimentos de auralização com os resultados obtidos. No sexto capítulo, os sinais obtidos virtualmente são comparados com os valores teóricos e obtidos experimentalmente e para comprovar a vasta aplicabilidade da técnica, foi feito o levantamento de alguns parâmetros da qualidade psicoacústica do recinto analisado. O sétimo e último tópico fará uma conclusão sobre os resultados obtidos, apontando as vantagens e desvantagens em se adotar a técnica, além de apresentar uma série de pontos que nortearão os trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

Fundamentação Teórica

O presente capítulo tem por finalidade apresentar ao leitor conceitos pertinente à propagação sonora, projeto de salas, parâmetros usados para aferir a qualidade acústica de ambientes reverberantes e por fim, discorrer sobre as técnicas previsionais mais usadas para prognosticar o nível de pressão sonora dos recintos.

2.1. Princípios da Propagação Sonora

A acústica é definida como a ciência do som que inclui a sua geração na fonte, a propagação através de oscilações ondulatórias através do meio e a percepção dos ouvintes inseridos no recinto analisado, (BERANEK; MELLOW, 2012).

Blackstock (2000) define uma onda como sendo o movimento de um distúrbio ou conforme Briggs e Oleg (2009) afirmam, trata-se de uma informação que vai de um meio a outro via um meio de propagação, com exceção das ondas eletromagnéticas. Em outras palavras, uma onda sonora trata-se de uma flutuação de pressão sonora no espaço e periódica no tempo.

Relações como comprimento de onda e período da onda, que é o inverso da frequência, são extraídas da oscilação espacial e do tempo decorrido para uma oscilação completa, respectivamente. A magnitude de um distúrbio em um meio durante um ciclo de onda é descrito pela amplitude.

Uma vez classificadas como sendo mecânicas, as ondas sonoras necessitam de um meio para se propagar longitudinalmente. Durante a perturbação a energia é

transferida de um ponto a outro através de movimentos muito sutis das moléculas em torno das suas posições de equilíbrio.

A equação da onda descreve o fenômeno da propagação das ondas num meio e é representado pela Equação Helmholtz, que na forma cartesiana é representada pela Eq.(2.1).

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1), P representa a pressão acústica, t a variável temporal, x, y e z variáveis espaciais e c a velocidade de propagação do meio. A derivação pode ser encontrada em detalhes em Gerges (2000) e Moura (2005).

A solução dessa Equação Diferencial Parcial (EDP) é de natureza hiperbólica, que estabelece uma relação entre o tempo e o espaço, e possui um formato característico de ondas. Segundo Barret e Wylie (1995), para garantir que possua esse formato, é necessário que o fenômeno propague com uma velocidade finita. A solução mais geral do problema é a Equação de d'Alembert, que inclusive serve de base para a metodologia de Guias Digitais de Ondas aplicadas na acústica, (MURPHY, 2007). Ela representa o somatório de ondas que chegam e das ondas que partem num ponto, assim como apresentado pela Eq. (2.2):

$$u = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (2.2)$$

A caracterização da onda e as interações com os obstáculos estão intimamente relacionados com a impedância acústica específica do meio (Z), que depende do meio e do tipo de onda presente (GERGES, 2000). Fisicamente, esse princípio está relacionado com a razão entre a pressão acústica do meio e a velocidade de partícula, representado pela Eq.(2.3), (FAN, 2012).

$$Z = \frac{P}{v} \quad (2.3)$$

Em outras palavras, a impedância está relacionada com a resposta que o sistema fornece mediante uma perturbação. A impedância Z, para ondas planas, pode ser expressa por um valor real de magnitude ρc , um produto da densidade e

velocidade de propagação no meio, respectivamente e cuja unidade de medida é [kg.m/s] ou [Rayls].

Para a propagação de ondas planas, a pressão e velocidade da partícula são relacionadas entre si da seguinte maneira:

- Ondas viajando no sentido positivo de eixo da coordenada, Eq. (2.4):

$$p = +Z_0 v \quad (2.4)$$

- Ondas viajando no sentido negativo de eixo da coordenada, Eq.(2.5):

$$p = -Z_0 v \quad (2.5)$$

Sendo Z_0 a impedância das ondas planas.

2.1.1. Interações das Ondas com Obstáculos

Certos fenômenos são intrínsecos à propagação das ondas sonoras, quer quando atravessam um meio com diferentes propriedades, quer quando uma ou mais ondas se sobrepõem numa mesma região do espaço (ELTER, 2013), (CHIQUITO; RAMOS, 2005). As Figuras 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 ilustram alguns comportamentos de ondas sonoras, mediante interação entre as ondas sonoras e o obstáculo.

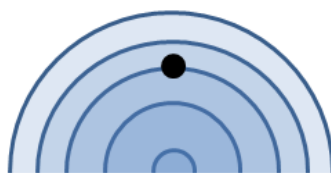


Figura 2.1 – Som com comprimento de ondas maior do que o obstáculo.

Nesse caso, a onda atravessa o obstáculo negligenciando-o. Esse caso caracteriza-se por ser um grande problema para o tratamento de ruído em baixas frequências, que têm o comprimento de onda grande.

A Figura 2.2 apresenta uma situação diferente, em que o comprimento de onda é menor que o obstáculo.

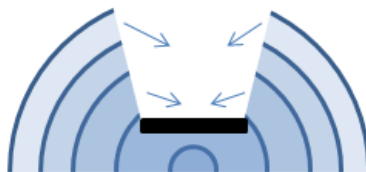


Figura 2.2 - Obstáculos com dimensões maiores que o comprimento de onda introduz uma sombra.

Conforme é possível observar na Figura 2.2, a barreira impede que as ondas atravessem por meio dela. Porém na região de contorno do obstáculo ocorre o fenômeno de difração, conforme indicado pelas setas, consequentemente criando um efeito de sombra acústica.

Por sua vez, a Figura 2.3 mostra o caso em que a abertura entre as barreiras permitem que o som atravesse para o outro meio. Para uma abertura grande a onda não “enxerga” o furo.

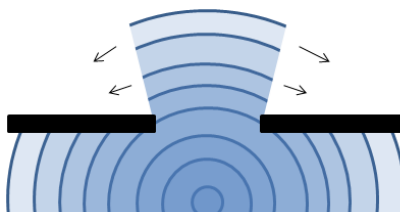


Figura 2.3 - Grande abertura em relação ao comprimento de onda. As ondas atravessam, mas a difração introduz som na sombra, indicadas pelas setas.

Para finalizar, a Figura 2.4 ilustra outra relação entre abertura entre as barreiras. Diferente da situação anterior, em que a abertura era grande, esse caso ilustra o caso em que a abertura é pequena em relação ao comprimento de onda.

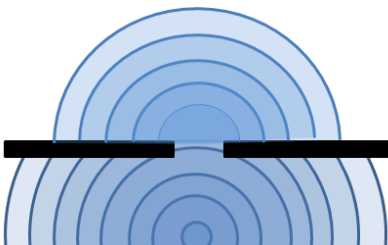


Figura 2.4 - Abertura pequena em relação ao comprimento de onda opera como uma nova fonte pontual de onde se originam fontes esféricas resultantes da difração.

Durante o processo de transmissão, as ondas sonoras são condicionadas de acordo com as características dos meios de propagação e suas variações (CAMPOS, 2003). A variação pode ser tanto gradual (no caso de estar dentro de um meio anisotrópico, como gradientes de temperatura, entre outros), quanto de maneira abrupta (quando ocorre na transição entre meios diferentes) e estão sujeitas a fenômenos como reflexão, absorção e superposição, como descritos a seguir:

- Reflexão: A transição entre meios diferentes é geralmente associada com uma descontinuidade da impedância acústica (CAMPOS, 2003) e (FAN e Y, 2012) em outras palavras, quando uma onda alcança um obstáculo, apenas uma parte de sua energia será transmitida, a outra parcela será retornada como uma onda refletida;
- Absorção: A absorção ocorre quando os obstáculos armazenam uma parcela da energia incidida sobre os mesmos. Dessa maneira, as condições de contorno do sistema caracterizam diferentes meios de propagação para a onda sonora. O comportamento de um dado material em contato com o ar é normalmente caracterizado pelo coeficiente de absorção, dado em porcentagem de energia absorvida de uma onda incidente.
- Interferência ou Superposição: Representa a interferência espacial, ou seja, um ponto no espaço de análise pode estar sujeito a várias fontes e/ou sobre a influência de ondas refletidas. A pressão acústica nesse ponto é a soma de várias contribuições individuais, que é conhecido como interferência. Ela é caracterizada como sendo destrutiva quando a contribuição tem sinais defasados, logo, um sinal tende a cancelar o outro. A interferência construtiva resulta de valores instantâneos de ondas superpostas com a mesma fase;

Sucintamente, quando uma onda progressiva propaga em um meio fluido e incide em um segundo meio, forma-se uma onda refletida (no primeiro meio), uma onda transmitida (no segundo meio). As razões entre as intensidades e amplitudes das pressões das ondas refletidas dependem das impedâncias características dos meios e do ângulo de incidência da onda.

Em geral, a precisão em descrever um campo sonoro deve contemplar os fenômenos físicos que as ondas sofrem durante a propagação.

2.1.2. Cálculo dos Coeficientes de Reflexão e Transmissão

As situações de reflexão e transmissão são ilustradas na Figura 2.5. Uma onda incide normalmente contra uma superfície AB que separa dois meios, cujas características de impedâncias são $Z_1 = \rho_1 c_1$ e $Z_2 = \rho_2 c_2$. Neste caso, a pressão sonora atinge o obstáculo (posicionado em $x=0$) representado por P^+ , uma parcela será refletida P^- e o restante será transmitida, P^{tr} .

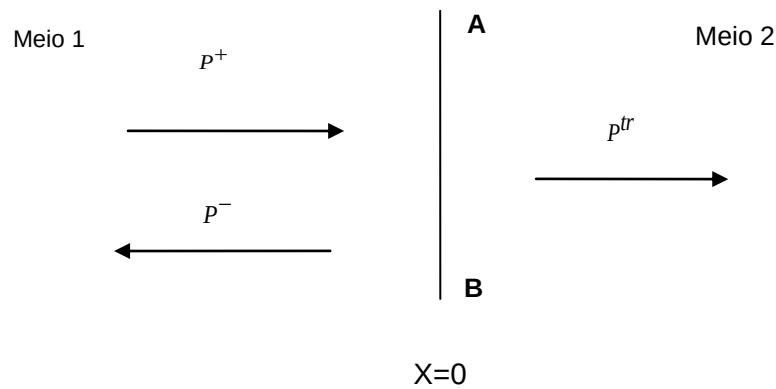


Figura 2.5 - Reflexão, absorção e transmissão de uma onda plana.

Matematicamente, a pressão das ondas incidentes, refletidas e incididas podem ser expressas pelas Eq. (2.6), Eq.(2.7) e Eq.(2.8):

Onda Incidente, Eq.(2.6):

$$p^+ = p^+(t - x/c_1) \quad (2.6)$$

Onda Refletida:

$$p^- = p^-(t - x/c_1) \quad (2.7)$$

Onda Transmitida:

$$p^{tr} = p^{tr}(t - x/c_2) \quad (2.8)$$

Os coeficientes de reflexão η e transmissão τ são definidos respectivamente pela Eq. (2.9) e Eq.(2.10):

$$\eta = \frac{p^-}{p^+} \quad (2.9)$$

$$\tau = \frac{p^{tr}}{p^+} \quad (2.10)$$

Tais expressões são encontradas aplicando duas condições de contorno (GERGES, 2000):

- 1- As pressões acústicas nos dois lados da superfície de separação AB são iguais, Eq.(2.11).

$$p^+ + p^- = p^{tr} \quad (2.11)$$

- 2- As velocidades de partículas normais à interface AB são iguais. Dessa forma, a velocidade total da partícula no lado esquerdo da interface AB da Fig.2.5 equivale a $v^+ + v^-$, ou seja, a velocidade das partículas incidentes e refletidas, respectivamente. Em contrapartida, a velocidade na parte direita, corresponde à velocidade da partícula que está sendo transmitida, assim como mostra a Eq.(2.12).

$$v^+ + v^- = v^{tr} \quad (2.12)$$

Para obter expressões em termos de η e τ , é necessário primeiramente, converter as condições de contorno para uma relação de pressão e impedância (BLACKSTOCK, 2000). Dividindo a Eq. (2.11) por p^+ e usando as relações: Eq.(2.9) e Eq.(2.10), obtém-se Eq.(2.13):

$$1 + \eta = \tau \quad (2.13)$$

Da segunda condição de contorno, obtém-se a Eq. (2.14):

$$v^+ + v^- = v^{tr} \quad \Longrightarrow \quad \frac{p^+}{Z_1} - \frac{p^-}{Z_1} = \frac{p^{tr}}{Z_2} \quad (2.14)$$

Relembrando que ao escrever uma relação usando impedância, é necessário incluir o sinal negativo para expressar a onda que viaja no sentido negativo.

Dividindo a Eq. (2.14) por P^+ , encontra-se a segunda relação, Eq. (2.15) entre η e τ :

$$1 - \eta = \frac{Z_1}{Z_2} \tau \quad (2.15)$$

Os valores de η e τ podem ser obtidos apenas em função das impedâncias dos meios, através do sistema algébrico composto pelas Eq.(2.13) e Eq.(2.15). A solução deste sistema se encontra através das Eq.(2.16) e Eq.(2.17):

$$\eta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.16)$$

$$\tau = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.17)$$

Na região de contorno, onde ocorre a reflexão, o sinal da pressão refletida que deixa a interface num instante $t_0 + \Delta t$ pode ser obtido a partir do sinal de pressão no instante anterior t_0 através das expressões Eq.(2.18):

$$p^-(t_0 + \Delta t) = \eta p^+(t_0) \quad (2.18)$$

Já na região onde ocorre a transmissão de um meio para outro, a pressão sonora é calculada pela Eq. (2.19):

$$p^{tr}(t_0 + \Delta t) = (1 + \eta)p^+(t_0) \quad (2.19)$$

Essas relações apresentadas nas Eq.(2.18) e Eq. (2.19) são usadas nas regiões de contorno na metodologia de Malha de Guias Digitais de Ondas, para representar a descontinuidade de impedância.

2.1.3 - Propagação Sonora em Ambientes Fechados

Antes de iniciar os cálculos para estimar o comportamento da propagação sonora propriamente, uma das primeiras ações a ser tomada pelos projetistas é verificar a característica do ambiente, que pode ser basicamente: aberto ou fechado.

Para a análise da propagação em ambientes abertos, três elementos devem ser considerados: a fonte, a trajetória e os pontos receptores. O esquema da Fig. 2.6 faz um apanhado sobre os elementos básicos da propagação sonora.



Figura 2.6: Parâmetros a serem avaliados na propagação sonora ao ar livre.

Sob o ponto de vista da acústica, uma fonte trata-se de um dispositivo capaz de inserir energia acústica no sistema (SAVIOJA, 2000). Fisicamente, podem ser classificadas por apresentar uma propagação esférica (pontual), cilíndrica ou plana. Geralmente é expressa em função do nível de potência e da diretividade, que sofrem influência da banda de frequência. Devido à capacidade de radiar energia isotropicamente, as fontes do tipo pontuais, particularmente, são muito difundidas nos processos de auralização.

O meio de propagação é responsável por extrair as características do ambiente sonoro no tempo e no espaço. Para o caso de propagação em campo aberto, o caminho de transmissão pode sofrer influência dos seguintes parâmetros: absorção, reflexão do solo, vegetação, barreiras e gradientes de temperatura e vento. Maiores detalhes desses quesitos estão presentes em Bistafa, (2006) e Gerges, (2000).

Os receptores, assim como a fonte, sofrem influência do seu posicionamento no recinto, interferindo na informação que neles chegam. Isso ocorre em virtude da

frequência do sinal, em outras palavras, devido à variação do comprimento de onda. Além disso, com a distância que o som tem que viajar (entre a fonte e receptor) ou a presença de obstáculos, pode ocorrer o princípio de mascaramento sonoro, prejudicando na compreensão do ouvinte.

Para o caso de ambiente fechado, além dos parâmetros válidos para ambientes abertos, como: característica da fonte e posicionamento das barreiras e receptor; é importante destacar que o som é caracterizado por dois campos distintos, o campo direto e o indireto, conforme ilustra a Fig.2.7:

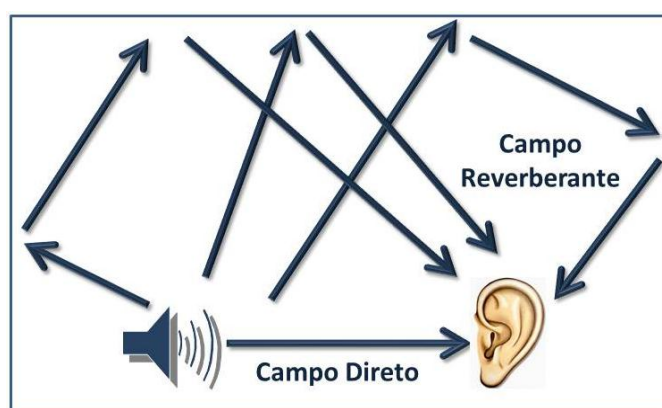


Figura 2.7: Propagação do som em recinto fechado com a caracterização do campo direto e indireto.

Como é possível observar na Figura 2.7, o campo direto é caracterizado pelo raio sonoro que sai da fonte e atinge o receptor de forma direta. Enquanto o campo indireto é caracterizado pela onda que sofre interferência durante a propagação, atingindo primeiramente os obstáculos para posteriormente alcançar os pontos receptores.

A onda direta, geralmente mais intensa, é acompanhada de uma sequência de ondas refletidas que chegam sucessivamente ao ouvido do receptor, dando origem ao campo reverberante. Fisicamente, a reverberação é produzida pelas reflexões múltiplas de sons em superfícies, que dispersam o som, enriquecendo-o por sobreposição de suas reflexões. Uma noção intuitiva da reverberação é a audição da persistência do som no recinto após a interrupção repentina da fonte sonora.

2.2. Acústica de Salas

A percepção sonora de um determinado ambiente é determinada pelos estímulos físicos que alcançam os ouvintes do recinto. De acordo com Gerges (2000) tais estímulos não são determinados exclusivamente pela fonte sonora, mas também pela influência que o meio exerce na propagação do som pelo ambiente.

Na avaliação do campo sonoro em ambientes fechados, é necessário levar em consideração: a forma geométrica do ambiente, fontes sonoras (espectros e diretividade), além da posição das fontes, barreiras e receptores (MOURA, 2005). No caso particular da engenharia, a concepção de salas acústicas deve satisfazer os objetivos específicos de cada projeto, como por exemplo: salas de teatro, igrejas, auditórios, entre outros (GERGES, 2000).

Todavia, nem sempre a construção desses ambientes foi fruto de todo esse trabalho. No princípio, havia muita divergência entre os músicos e os pesquisadores, consequentemente, as pesquisas em acústica de salas eram baseadas em empirismo, sem conceitos unânimes que permitissem uma comunicação entre os universos da arte e da ciência (FIGUEIREDO, 2005).

2.2.1 – Critérios de Qualidade Acústica

Em linhas gerais, conforme constatado por Valadares (2002), para a concepção de projetos arquitetônicos com qualidade acústica, não há elementos quantitativos suficientes para avaliar a qualidade acústica ou predizer os efeitos da constituição arquitetônica de uma sala. Na avaliação do desempenho acústico de ambientes, necessidades humanas para comunicação com privacidade por meio da fala e da música devem ser atendidas para prover condições de comunicação inteligível e consequentemente proporcionar o conforto acústico.

Nesse sentido, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos para avaliar o desempenho das salas acústicas. Rosão e Inácio (2012), por exemplo, fazem um levantamento a respeito das Casas de Fado portuguesas, que se trata de um restaurante mas que também é voltado para apresentações musicais. De acordo com os autores, o trabalho foi motivado pela pouca pesquisa nesse tipo particular de recinto e para isso, estabeleceram um comparativo entre os resultados de medições acústicas *in situ* e a opinião dos frequentadores do local, enfatizando a qualidade acústica dos espaços. Baseados em parâmetros da Norma ISO 3382-1, 2009, foram elencados cinco itens (*Tempo de Decaimento Inicial, Clareza, Definição, Tempo*

Central, Energia Lateral). Dessa forma, foram realizados os cálculos previstos na norma e os resultados foram confrontados com a opinião dos ouvintes, cujas opiniões foram analisadas por meio de um questionário. Como conclusão, eles constataram que os ambientes com o tempo de reverberação maior apresentaram maior predileção com relação aos demais, impactando diretamente nos parâmetros da qualidade. Para maiores detalhes sobre os procedimentos e resultados, consultar: Rosão e Inácio (2012) e Rosão (2012).

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Marros (2012) propõem novos critérios para avaliar ambientes de pequeno porte, tais como salas de aula para práticas de ensino musical. Em seu trabalho, a autora argumenta que a maioria dos trabalhos usa como parâmetros de comparação valores que foram extraídos de ambientes de grande porte tais como salas de concerto. Nesse sentido, durante o trabalho é feito o levantamento teórico, simulação numérica e testes com usuários dos ambientes, cujos resultados convergiram para parâmetros e valores que servirão de comparação para ambientes de dimensões reduzidas. Para maiores esclarecimentos, consultar Marros (2012).

A psicoacústica trata-se de um item que elucida de que forma o sistema auditivo percebe o som (JÚNIOR, 2005), em outras palavras, o mesmo estuda a relação entre sensações auditivas e as características físicas do som. Tal área possui uma relação de reciprocidade com a auralização e a qualidade acústica dos recintos, (CHANDAK; ANTANI; MANOCHA, 2011) Por um lado, auxilia os sistemas de auralização no que diz respeito à percepção humana do som, por outro, segundo Kleiner, (1993) permite que pesquisas no campo da psicoacústica sejam aperfeiçoadas. Isso ocorre, porque durante o processo, os projetistas poderão fazer ajustes em parâmetros tais como posicionamento da mobília e mudança no material dos obstáculos, objetivando conceber projetos previamente otimizados, evitando surpresas desagradáveis durante o seu uso no futuro.

Pela importância dos parâmetros de qualidade acústica, faz-se necessário uma abordagem mais criteriosa a respeito do tema. Assim sendo, nos itens a seguir serão abordados alguns parâmetros muito difundidos para estimar a qualidade acústica dos recintos.

Tempo de Reverberação

Fisicamente, uma sala acústica é caracterizada pela sua resposta impulsiva, que é calculada pelo par fonte-receptor (ISO 3382-1, 2009), (BERANEK; MELLOW,

2012), (GERGES, 2000). Em outras palavras, a resposta que alcança um determinado receptor posicionado no ambiente, que por sua vez sofre uma perturbação da fonte, descreve completamente o sistema acústico entre esses dois pontos e, portanto, serve como uma boa base para interpretação da sala acústica. Um típico exemplo de Resposta ao Impulso de uma sala, ou Curva de Decaimento de Energia é mostrado na Fig. 2.8.

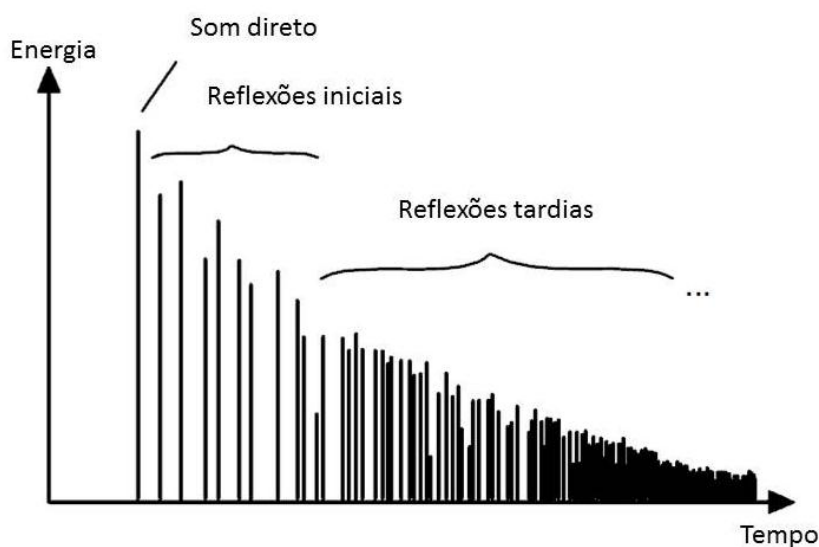


Figura 2.8: Curva de decaimento de energia com relação ao tempo, Resposta Impulsiva da Sala. Figura modificada de Vorlander (2008).

Ao analisar a Fig. 2.8, observa-se que os componentes na curva de decaimento de energia são arranjados de forma a caracterizar uma série de pulsos e ainda é possível destacar basicamente três fases distintas: som direto, reflexões iniciais e a cauda reverberante. O primeiro impulso, do som direto, é caracterizado pelo sinal emitido pela fonte e que atinge o receptor sem sofrer distorção do ambiente. As reflexões iniciais auxiliam na determinação da percepção da direção da incidência sonora e as reflexões. Beranek e Mellow (2012) fazem um levantamento a cerca dessa etapa e afirma que os sons refletidos pelos obstáculos ainda podem ser distinguidas temporariamente, uma a uma pelo sistema auditivo, e como consequência, essa etapa fornece ao ouvinte a maior parte das informações espaciais a respeito do ambiente devido à capacidade da distinção das direcionalidades, dos tempos de chegada e da intensidade dessas contribuições. Já as reflexões tardias representam a porção temporal na qual o campo sonoro, após inúmeras reflexões, se

torna difuso e denso, inviabilizando a distinção dos sinais auditivos que chegam aos ouvidos humanos.

À medida que as ondas interagem com os obstáculos e com o próprio ar, elas perdem energia para o sistema e se tornam cada vez mais fracas. O tempo desse decaimento de energia pode ser expresso pelo tempo de reverberação. Figueiredo (2005) afirma que dependendo do tempo de duração da reverberação, pode haver uma confusão na compreensão dos sons pelos ouvintes, uma vez que as sílabas faladas ou as notas musicais que não são amortecidas pelo ambiente podem misturar-se umas a outras comprometendo a qualidade do áudio no recinto.

Historicamente, o físico norte-americano Wallace C. Sabine foi o primeiro a relacionar a reverberação como um parâmetro de qualidade, constatando que tanto a quantidade como a qualidade da reverberação que ocorre em um ambiente é influenciada por fatores, tais como o volume, dimensões do espaço; o tipo, a forma e o número de superfícies com que o som se encontra, além da frequência do sinal. No início do século passado, após avaliar inúmeras salas, Sabine expressiu uma equação empírica para calcular o Tempo de Reverberação (TR), que equivale ao tempo durante o qual, estando desligada a fonte, a intensidade do som cai a um milionésimo (10^{-6}) do seu valor ou, em outros termos, o tempo em que o nível sonoro decai 60 dB. A seguir é apresentada a Eq. (2.20) para calcular o tempo de reverberação:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A} \quad (2.20)$$

Onde:

V é o volume da sala;

A é a área equivalente de absorção, cujo valor é calculado pela Equação (2.21)

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad (2.21)$$

Em que:

S_i i -ésimas áreas que compõem a superfície total da sala;

α_i coeficiente de absorção de cada área.

A equação de Sabine pressupõe absorção contínua do som e repartição homogênea de intensidade, em outras palavras, trata-se de uma sala de forma não muito irregular onde a energia das ondas sonoras é absorvida com suficiente lentidão, de maneira tal que, num dado instante se possa considerar a energia total presente como distribuída uniformemente por todo o volume do recinto. Assim, a equação de Sabine é bastante precisa para ambientes vivos, que apresentam coeficiente de absorção menor ou igual a 0,2.

Posteriormente, Eyring-Norris aperfeiçoou a Equação de Sabine, fazendo-a aplicável a todas as salas, sejam essas reverberantes (vivas), médias ou secas (mortas). Para uma sala ser descrita como viva, média ou morta é preciso observar o tempo de reverberação médio da mesma. A Tab. 2.1 apresenta uma breve descrição dos tempos de reverberação típicos para cada um dos casos, bem como os intervalos do TR para que cada quesito se enquadre e alguns representantes de cada categoria.

Tabela 2. 1: Tempo de reverberação típicos

Parâmetro	Muito Seca	Seca	Normal	Viva	Muito Viva
Tempo de Reverberação –TR [s]	$0.2 < TR < 0.25$	$0.4 < TR < 0.5$	$0.9 < TR < 1.1$	$1.8 < TR < 2.2$	$2.5 < TR < 4.5$
Típico	Estúdio de Gravação	Restaurante	Escritório	Hospital	Catedral
		Teatro	Biblioteca	Igreja	Fábrica
		Sala de aula	Quitinete		
Coeficiente de absorção médio $\bar{\alpha}$	0.40	0.25	0.15	0.1	0.05

Assim sendo, a equação de Eyring-Norris, descrita pela Equação (2.22), dá previsões mais aproximadas nos recintos comuns e mortas. Nesta equação, além das considerações comuns a todas as equações, existe ainda a suposição de uniformidade do valor do coeficiente de absorção para todas as superfícies refletoras. Nesse sentido, a precisão do resultado é satisfatória quando não houver grandes diferenças de valores de absorção para as diversas porções das paredes e demais superfícies refletoras, ou ainda, quando os elementos, com absorções diferentes, estiverem bem misturados e regularmente distribuídos em toda a superfície de contorno. O valor calculado para o tempo de reverberação será tanto mais preciso quanto mais a condição real se aproximar dessas hipóteses.

$$TR = \frac{0.161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.22)$$

Sendo:

S é a área interna da superfície da sala;

$\bar{\alpha}$ é o coeficiente de absorção médio obtido pela Eq.(2.23);

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S} \quad (2.23)$$

Conforme discutido por Gerges (2000), o tempo de reverberação é uma característica importante da sala. Dessa forma, ambientes projetados para baixas frequências, não apresentarão boas características acústicas em altas frequências. A Fig. 2.9 traz uma compilação de diferentes tempos de reverberação ótimos para tipos de salas distintos, em função do volume e da frequência.

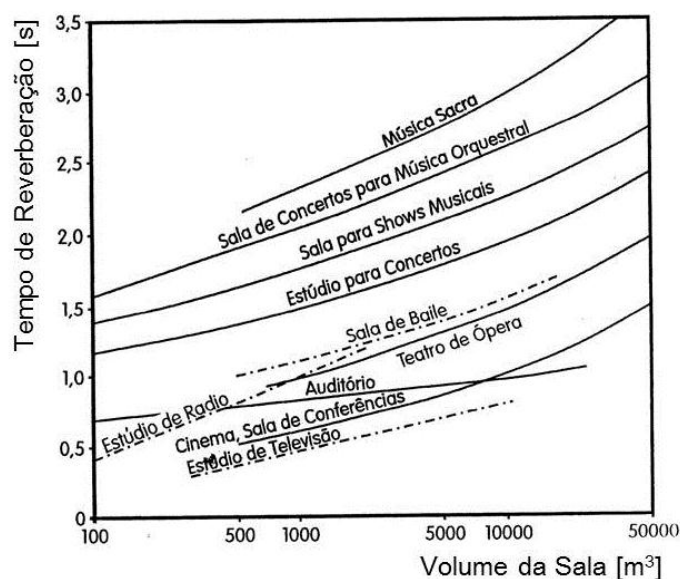


Figura 2.9: Tempo ótimo de reverberação, modificada de Gerges, 2000.

De acordo com o esquema acima, para escolher o tempo de reverberação ótimo é necessário primeiramente determinar a finalidade de cada ambiente (sala de aula ou de teatro, por exemplo). Geralmente, para salas médias e pequenas, usadas para escritórios, o tempo de reverberação é de 0,5 [s] aproximadamente. Já para um

recinto mais específico como uma sala de música deve ser mais reverberante do que uma sala de aula. Além disso, é importante destacar que num projeto de auditório há uma grande variação quando há presença de público, uma vez que as próprias pessoas, bem como as mobílias presentes servem como obstáculo para a propagação, absorvendo uma parcela da energia sonora do ambiente.

Experimentalmente, o tempo de reverberação, assim como os demais parâmetros para avaliação da qualidade acústica de salas, pode ser obtido através da resposta impulsiva da sala. Iazzetta et al. (2004) explicam que, a partir da resposta impulsiva, Schröder desenvolveu um método nomeado de Integração do Quadrado da Resposta Impulsiva que é capaz de otimizar o processo de obtenção dos tempos de reverberação de recintos através da curva de decaimento da energia em função do tempo, conhecida como curva de Schröder. Este método consta na norma ISO 3382, a qual é utilizada para determinar os procedimentos de medição envolvendo a qualidade acústica de recintos fechados. Para efeitos da norma, o TR ou T_{60} é calculado por regressão quadrática linear da curva de decaimento medida a partir dos 5 dB até 35 dB abaixo do nível de pressão sonora inicial (MARROS, 2012). O TR pode ser apresentado por banda de oitava, sendo mais usual na bibliografia encontrar valores somente para a banda de 500 Hz ou para o resultado da média aritmética dos tempos de reverberação nas frequências de 500 e 1.000 Hz.

Mesmo com todo o estudo referente ao tempo de reverberação ideal, salas com o mesmo tempo de reverberação apresentam um desempenho muito diferenciado. Assim, em meados da década de 60, Beranek percebendo a divergência de conceitos entre os profissionais relacionados à acústica, constatou que além do tempo de reverberação e o volume da sala, havia mais parâmetros necessários para avaliar a qualidade acústica e prever os efeitos da constituição acústica de uma sala e dessa forma elencou uma série de conceitos pertinentes a esse universo.

Conforme Bastos (2010) pontua em seu trabalho e reafirmando o pensamento de Beranek, além do tempo de reverberação, existem outras quantidades específicas importantes para descrever o efeito subjetivo geral de uma sala, que dependem da posição do ouvinte na sala. Esses parâmetros são obtidos a partir da resposta impulsiva do espaço em estudo, que por sua vez, pode ser determinada através de uma excitação do tipo Delta de Dirac ou através de outros métodos como o MLS (*Maximum Length Sequence*).

Tempo de Decaimento Inicial (EDT – *Early Decay Time*)

Parâmetro relacionado à reverberação e é utilizado para descrever as condições de decremento de energia sonora para 10 dB, em outras palavras, EDT é o tempo, em segundos, para que a energia sonora decaia 10 dB. Rosão e Inácio (2012) reforçam que esse item aplica-se, sobretudo, a espaços com grandes volumes, tal qual grandes salas de concerto. A distinção entre TR e EDT está no valor do desnível de pressão sonora, adotado, respectivamente de 60 dB e 10 dB, assim como representado pela Eq.(2.24).

$$EDT = \frac{TR}{6} \quad (2.24)$$

Numa escala logarítmica, Eq.(2.25):

$$EDT = 10 \log \left[\frac{EDT}{EDT_{pref}} \right] \quad (2.25)$$

A norma ISO 3382 (2009) assinala que o EDT é subjetivamente mais importante que o TR, pois está relacionado com a percepção da reverberação, enquanto o TR está relacionado às propriedades físicas da sala. Boren (2011) afirma que este parâmetro é apropriado para analisar as diferenças de percepção entre diversas posições dentro de um recinto, porém deve-se tomar cuidado com posições muito próximas à fonte, pois perto desta, a energia sonora inicial decai abruptamente antes de iniciar um decaimento mais gradual.

Vivacidade (*Liveness*)

Uma sala é dita viva quando o ouvinte é atingido por muitas reflexões de médias e altas frequências, acima de 350 Hz. Uma sala reverberante é dita viva enquanto uma sala com pouca reverberação é dita morta ou seca (MARROS, 2012), (ANDO, 1985). Beranek (1996) acrescenta que uma sala é considerada seca ou morta quando o tempo de reverberação é inferior a 1,6 segundos. Acima deste valor, as salas passam a ser consideradas vivas.

Calor (Warmth)

O calor (BR) é um parâmetro subjetivo relacionado à percepção do tempo de reverberação nas baixas frequências, abaixo de 250 Hz. Pode ser definido ainda como vivacidade dos graves ou reforço de graves. Segundo Beranek (1996), um TR nas baixas frequências muito longo ou muito curto comparado com um TR nas médias frequências pode afetar consideravelmente a percepção dos músicos. O parâmetro subjetivo calor pode ser avaliado através do parâmetro objetivo razão de graves (BR), dado pela equação 2.26.

$$TR = \frac{(TR_{125} + TR_{250})}{(TR_{500} + TR_{1000})} \quad (2.26)$$

Em escala logarítmica, Eq.(2.27):

$$BR = 10 \log \left[\frac{BR}{BR_{pref}} \right] \quad (2.27)$$

Os valores de BR_{pref} , variam de acordo com o tempo de reverberação, Eq. (2.28).

$$\begin{aligned} (BR)_{pref} &= [1,1;1,25] \text{ [s] para } TR > 1,8 \text{ [s]} \\ (BR)_{pref} &= [1,1;1,45] \text{ [s] para } TR \leq 1,8 \text{ [s]} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Brilho

Um som claro, vibrante e rico em harmônicos, é chamado brilhante (AHNERT; SCHIMITD, 2005). O som brilhante de uma sala deriva da proeminência dos harmônicos superiores e do baixo decaimento para estas frequências, em outras palavras, as médias frequências são mais acentuadas e decaem vagarosamente.

Trata-se de um parâmetro afetado pelo intervalo entre a chegada do som direto e as primeiras reflexões. Também está relacionado com a rapidez da chegada da porção significativa da energia nas primeiras frações de segundo (clareza).

O Brilho (Br) pode ser quantificado através da razão entre tempos de reverberação nas médias (500 e 1.000 Hz) e nas altas frequências (2.000 e 4.000 Hz), dada pela Equação (2.29). Beranek (1996) afirma que, para preservar o brilho em uma sala, o Br não pode estar abaixo de 0,70.

$$Br = (RT_{2000} + RT_{4000}) / (RT_{500} + RT_{1000}) \quad (2.29)$$

Definição (Definition) e Clareza (Clarity)

Proporciona ao ouvinte a audição de uma música com definição, articulações sonoras límpidas e precisas independentemente de seu andamento, caso contrário o som apresenta confuso e indefinido, principalmente nas passagens mais rápidas (MARROS, 2012). Para Beranek (1996), quando um músico fala em Definição (*Definition*) ou Clareza (*Clarity*), está referindo quanto ao grau de distinção entre um som e outro em uma performance musical.

A Clareza (C80) é definida pela razão logarítmica, entre a energia inicial (0 a 80 ms) e a energia total (reverberante) do som (80 a 3.000 ms), em outras palavras, é a média espacial da razão entre a energia sonora do som inicial devido a um som impulsivo, conforme é apresentado na Eq. (2.30).

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80}^{300ms} p^2(t) dt} [dB] \quad (2.30)$$

Por sua vez, a Definição (D₅₀), habitualmente aplicado para avaliar salas dedicadas à palavra falada, é a razão linear entre a energia que chega nos primeiros 50 ms e a energia total, conforme apresentado pela Eq.(2.31):

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{80}^{300ms} p^2(t) dt} 100\% \quad (2.31)$$

O valor da Definição está compreendido entre 0 e 100% e quanto maior for o valor de Definição, maior será a capacidade do ouvinte em distinguir cada sílaba, sendo que acima de 50% já é considerado aceitável.

Em uma sala seca o C_{80} e o D_{50} serão maiores do que numa sala reverberante, pois nesta, o decaimento da energia sonora é mais lento e, portanto, mais energia estará concentrada na parte final de cada som, diminuindo a razão entre energia inicial e final.

Em seus estudos, Beranek (1996) utiliza um valor médio de C_{80} para as bandas de frequências de 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz para comparar os resultados de forma mais sensível, denominado $C_{80}(3)$ (MARROS, 2012). Ele comenta que diferentes valores podem ser preferidos para diferentes situações.

Tempo Central (Center Time) (T_s)

Demarca o tempo de decaimento da metade da energia da resposta impulsiva. O Tempo Central (T_s) dado em milissegundos, é definido segundo Barron (1971) como o centro de gravidade ao longo do eixo do tempo do quadrado da resposta impulsiva. É uma grandeza alternativa para quantificar a clareza de uma sala. Mannis (2008) indica valores de referência para T_s entre 0 e 50 ms para fala e entre 50 e 250 [ms] para a música, Eq.(2.32)

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad (2.32)$$

Fator de Força (Strength)

Um importante fator na avaliação da qualidade acústica de salas é a influência da sala no *loudness*, (nível sonoro relativo) percebido (MARROS, 2012). Em outras palavras, o parâmetro de força, G está relacionado com as condições de impressão espacial nos ouvintes. Ele pode ser mensurado a partir da diferença em dB entre o nível de pressão sonora de uma fonte calibrada medida em uma sala e o nível de pressão sonora que esta mesma fonte gera a uma distância de 10 [m] em um ambiente anecóico, assim como apresentado na Equação (2.33):

$$G = 10 \log\left(\frac{T}{V}\right) + 45 \text{ dB} \quad (2.33)$$

Beranek (1996) e Peter et al (2011) afirmam que em salas com uma boa qualidade acústica os valores de G (nas frequências médias de 500 e 1.000 Hz) variam entre 4,0 e 5,5 dB, entretanto, em salas com diferentes usos, esta faixa pode ter uma variação maior.

Fração de Energia Lateral (*Lateral Energy Fraction*)

Trata-se da razão entre a energia que chega pelas laterais e a energia que chega na forma omnidirecional a um ponto (MOONEY, 2011). Trata-se de uma medida relacionada à sensação espacial que a sala proporciona e trata-se de uma medida binaural e está representada pela Eq.(2.34):

$$LEF = \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) \cos \varphi dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (2.34)$$

O ângulo de incidência φ é definido entre o eixo que transpassa as orelhas e a direção do som incidente, enquanto que o limite de 80 [ms] se refere à energia inicial. Investigações a respeito da espacialidade, determinam que a contribuição de uma reflexão é a sensação de espaço independente do tempo de atraso desta faixa entre 0 e 80 [ms] e que a causa primordial da sensação de espaço pode ser obtida por poucas reflexões desde que estas sejam incoerentes, relativamente intensas e que seus atrasos não excedam 100 [ms] e que elas sejam reflexões laterais.

Coeficiente de Correlação Cruzada Inter-Aural de Sons (IACC)

O coeficiente de correlação cruzada inter-aural trata-se de uma medida binaural de diferença de sons que atingem os dois ouvidos. Segundo Beranek (1996), o valor $\rho_{IACC}=(1-IACC_E)$ correlaciona com a percepção subjetiva da largura da fonte sonora (AWS - *Apparent Sound Width*) e o valor $\varepsilon_{IACC}=(1-IACC_L)$ correlaciona a percepção subjetiva do envolvimento pelo som (*LEV: Listener Envelopment*). Com medidas binaurais, como por exemplo a colocação de microfones em cabeças artificiais, é possível calcular a correlação interaural, (AHNERT; SCHIMITD, 2005). Através de respostas impulsivas capturadas pela orelha direita e esquerda ($p_R(t)$ e $p_L(t)$) a medida de correlação interaural segundo a ISO 3382 (2009) são calculadas através da Eq.(2.35), que é uma função de correlação interaural (*IACF: Interaural cross correlation function*):

$$IACF_{t1t2}(\tau_{IAC}) = \frac{\int_{t1}^{t2} P_L(t)P_R(t + \tau_{IAC})dt}{\left[\int_{t1}^{t2} P_L^2(t)dt \int_{t1}^{t2} P_R^2(t)dt \right]^{1/2}} \quad (2.35)$$

Onde:

$P_{L(\tau)}$: Pressão sonora rms no ouvido esquerdo, $[N.m^2]$.

$P_{R(\tau)}$: Pressão sonora rms no ouvido direito, $[N.m^2]$.

t_1 e t_2 são os limites de integração de em $[ms]$, sendo que

para $IACC_{e(arly)}$: $t_1:0[ms]$ a $80[ms]$

para $IACC_{l(ate)}$: $t_1=80[ms]$, $t_2=500$ a $20000[ms]$.

Os coeficientes de correlação cruzada IACC são calculados usando a função de correlação cruzada $IACF(\tau_{IACC})$, Eq.(2.36):

:

$$IACC_t = |IACF(\tau_{IACC})|_{\max}, \text{ para } -1 \leq \tau_{IACC} \leq 1 \quad (2.36)$$

O valor de $IACC_{e(arly)}$ é obtido para um intervalo de integração entre 0 e 80 $[ms]$.

2.3. Acústica Previsional

Um grande obstáculo a ser vencido na concepção de projetos acústicos reside na dificuldade em determinar o comportamento acústico de um determinado ambiente, que em alguns casos, ainda não existe fisicamente por se tratarem de projetos (ANDO, 1985), (GOMES; BERTOLI; DEDECCA, 2007). Isso implica no desconhecimento de características tais como: forma, dimensão, materiais e tipo de excitação ao qual o sistema será submetido. Devido à gama de considerações a serem feitas, uma análise analítica foge desse escopo, por ser necessário fazer inúmeras considerações e consequentemente, restringir os detalhes sendo impraticável sua solução (AWARD ET AL, 2012).

Realizar a modelagem acústica de uma determinada sala consiste basicamente em calcular a resposta impulsiva de um ambiente (BEENSON; MURPHY; SHELLEY, 2008), (MURPHY, 2008) e (MURPHY; MULLEN, 2002).

De forma sucinta, a acústica previsional pode ser definida como um conjunto de técnicas utilizadas para prognosticar o nível de ruído dentro de um ambiente

determinado. O uso de ferramentas previsionais tem como finalidade mapear e simular os níveis de ruído gerados em um recinto, sendo capaz de avaliar e apontar melhorias ainda na fase de projeto. Consequentemente, os testes experimentais poderão ser realizados em modelos já otimizados, economizando tempo e ampliando as ações do projetista.

Certos fatores podem influenciar no modelo de acústica previsual a ser adotado, como por exemplo a característica da fonte (linear, pontual ou plana), o posicionamento da fonte e receptor (que também é influenciado pela frequência do sinal sonoro, em virtude do comprimento de onda) e a característica do campo sonoro (aberto ou fechado).

Em seu trabalho, Andrade (2004) e Andrade, Slama e Azevedo, (2004) apresentam um fluxograma, mostrado na Fig.2.10, que ilustra as etapas necessárias para o uso da técnica previsual.

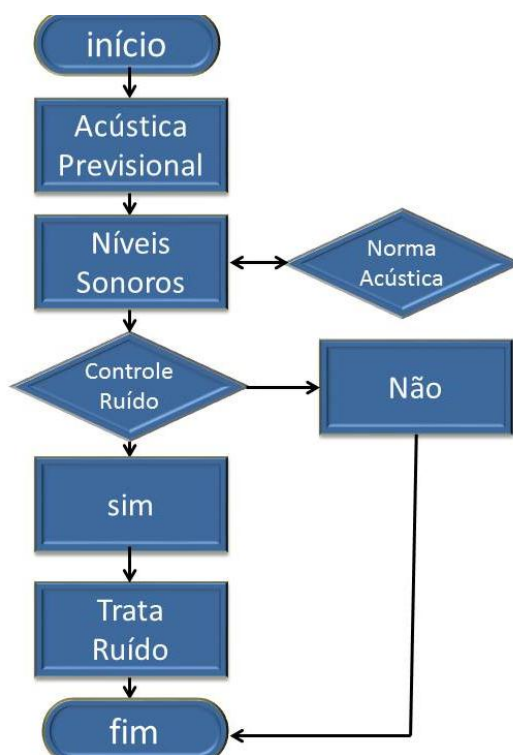


Figura 2.10: Fluxograma para o uso da técnica de acústica previsual, figura modificada de Andrade, Slama e Azevedo, (2004).

No fluxograma apresentado, o passo inicial é caracterizado por definições do recinto, como por exemplo, o Nível de Potência Sonora (NWS), posicionamento da fonte e receptores, tipo e tamanho do ambiente, presença de obstáculos entre a fonte

e os pontos receptores, tempo de simulação, entre outros. Na etapa de acústica previsional é possível escolher entre os métodos numéricos usados para a simulação do campo sonoro, tais métodos serão detalhados na próxima seção. No item Níveis Sonoros, os valores de Nível de Pressão Sonora - NPS são coletados em determinados pontos selecionados pelo usuário e correlacionados com os valores vigentes na Norma Acústica. Caso seja necessário fazer um tratamento do ruído, como por exemplo, o ruído excede ao valor permitido pela norma, o tratamento poderá ser simulado através de barreiras ou outros artifícios que serão usados com o intuito de obter um valor de NPS que se enquadre com os que são previstos pela norma. Caso não seja necessário tal tratamento, os níveis calculados pelos métodos da acústica previsional serão os dados obtidos.

No que tange a propagação sonora pelo recinto, várias técnicas estão disponíveis na literatura. Porém, nesse ponto é importante salientar que a escolha do método deve priorizar aqueles que são capazes de simular e fazer uma leitura dos sinais acústicos captados em cada receptor. Com o auxílio dessa ferramenta é possível extrair as mais diversas características do sistema, tais como os níveis de pressão sonora, bem como as frequências predominantes em cada ponto.

No mercado estão disponíveis alguns sistemas computacionais, tais como pacotes fechados, ou mesmo módulos (*pluggins*) para simulação de acústica previsional. Basicamente são responsáveis pelo mapeamento sonoro, controle de ruído, projetos de auditório e alguns até possuem o módulo de auralização de salas inclusos. Dentre os mais difundidos é possível citar o *CATT Acoustic*[®], *Ramset*[®], *Aurora*[®], *AcMus*[®], *Diva*[®], *Raynoise*[®] e o *Odeon*[®], que na sua maioria, usam algoritmos geométricos, que por sua vez, se baseiam na característica geométrica do ambiente para calcular a Resposta Impulsiva da Sala, em outras palavras, obtendo a função transferência do sistema. Na sequência, serão apresentados alguns modelos adotados para análise de salas.

2.3.1 – Modelo em Escala

Um método bastante difundido entre os pesquisadores consiste em empregar os modelos em escala, tentando reproduzir sua geometria e os materiais com os quais ela será construída. Esse tipo de abordagem é especialmente usado em análise de grandes ambientes (KUTTRUFF, 2000), (MARKEL; GRAY, 1976). Com o auxílio dessa técnica é possível ao projetista fazer experiências com materiais e geometrias diferenciadas.

Tôrres (2008) faz um levantamento sobre as diferentes técnicas usadas para estimar o campo sonoro nesse tipo de análise. A primeira apresentada pelo autor, consiste em utilizar ondas de água, mais precisamente, tanques preenchidos por água, com o intuito de observar as trajetórias das ondas. Nesse ponto, cabe salientar que esse tipo de abordagem se restringe ao estudo das seções planas das salas.

Outra alternativa trata-se do emprego de luz em detrimento ao som. Nessa situação, para simular a absorção das paredes, elas são pintadas ou cobertas de materiais da cor preta, enquanto as áreas refletoras são feitas de um material polido. Áreas propícias à reflexão difusa são simuladas usando-se um pedaço de papel branco, conforme pode ser visto na Fig. 2.11. Com isso, a detecção da energia pode ser feita através de células fotoelétricas ou mesmo por fotografias. No entanto, muitos problemas surgem devido à velocidade da luz e a difração. Para os modelos em escala, atualmente tem sido usado transdutores eletroacústicos.



Figura 2.11: Representação do modelo em escala da Sydney Opera House. Figura retirada Rindel e Christensen, (2009).

Embora a técnica apresente resultados satisfatórios, a maior desvantagem desse tipo de análise consiste no elevado custo de tempo, e financeiro, para esquematizar diferentes situações da vida real. Mesmo assim, muitos trabalhos em auralização têm sido feitos usando esse paradigma, sendo inclusive, o primeiro tipo de

análise a ser feita para auralização de salas, no início do Século XX. Maiores detalhes serão abordados no Capítulo 3.

2.3.2 – Modelos Geométricos

Outro tipo de análise muito difundida trata-se de acústica geométrica de sala, usando técnicas geométricas. A ideia básica dessa abordagem está em assumir que a propagação ocorre ao longo de linhas estreitas comparáveis aos raios luminosos, FORSTER (2008). Nesse caso, os raios sonoros são interpretados como raios luminosos e os raios são refletidos ou refratados pelas superfícies dos materiais e condições de contorno, (MOURA, 2005). Porém, para ser possível essa analogia é necessário considerar comprimentos de onda suficientemente pequenos, sendo inviável para situações de baixa frequência.

Para classificar um determinado comprimento de onda dentro de uma faixa aceitável para a simplificação proposta é preciso considerar as dimensões da área a ser modelada. Para efeito de simulações acústicas em ambientes fechados, é possível estimar um valor mínimo para a frequência simulada em função das características geométricas do ambiente, e do tempo de reverberação, através da equação de Schroeder, Eq. (2.37), aplicável para altas frequências:

$$f_{Schroeder} = 200 \sqrt{\frac{TR}{V}} \quad (2.37)$$

Onde: TR – tempo de reverberação; V – volume considerado (sala);

Em acústica geométrica, o raio sonoro tem origem num certo ponto que irradia energia com uma frente de onda esférica. Ele possui uma direção bem definida e sua propagação é regida pelas mesmas leis de propagação de um raio de luz, porém com velocidade do som.

De acordo com Kuttruf (2000) e Looki (2002) a simulação acústica dentro do recinto é feita pela lei de reflexão. Ao contrário da ótica geométrica, em acústica de salas não é considerada a mudança de meio nem a refração decorrente de tal mudança. A velocidade de propagação do som é responsável por muitos efeitos importantes como reverberação. Ainda segundo o autor, o fenômeno da difração é negligenciado, pois os raios sonoros são propagados em linhas retas. A interferência também não é

diretamente considerada, isto é, se os componentes de vários campos sonoros são sobrepostos, suas relações de fase simplesmente não são modeladas explicitamente, ao invés disso, somente suas densidades de energia e intensidades são adicionadas.

Na sequência serão apresentados os algoritmos de *Ray Tracing* e Fonte Imagem.

Ray Tracing

Esta metodologia considera que a energia sonora emitida pela fonte se propaga em forma de um número limitado de raios luminosos, ou seja o som se propaga por meio de caminhos lineares. Cada raio tem uma energia inicial igual à energia total da fonte dividida pelo número de raios e viaja na velocidade do som, colidindo com os obstáculos.

As fontes sonoras virtuais dessa metodologia podem ser classificadas como pontuais e são representadas pela emissão de uma grande quantidade de raios sobre todas as direções ao redor do ponto central de onde a fonte sonora está localizada, Figueiredo (2005). Além disso, as fontes irradiam o espectro de potência sonora de acordo com sua diretividade. Conforme discutido no trabalho de Camilo, Tenenbaum, e Coelho (2002) a melhor geometria para representar uma fonte sonora é o isocaedro, representado pela Fig. 2.12, pois conseguem representar com mais homogeneidade a distribuição de energia, simulando assim, uma fonte pontual com propagação esférica.

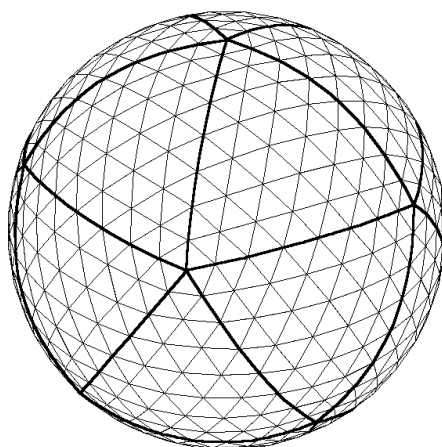


Figura 2.12: Subdivisão sobre um dos triângulos originais do isocaedro. Disponível em Tenenbaum e Camilo (2004)

Propagando-se em linha reta, o raio pode sofrer atenuação devido aos efeitos dissipativos, como a viscosidade do ar e pela atenuação da energia pelas superfícies

de contorno. Ao atingir os obstáculos, certa parcela da energia sonora é absorvida pelo próprio obstáculo, outra parcela é transmitida e a energia ainda pode sofrer reflexão, do tipo difuso (na qual os raios se dissipam por todas as direções) e do tipo especular (obedecendo a Lei de Snell, em que o raio incidente, normal à superfície e o raio refletido por esta, estão num mesmo plano, com o ângulo θ de reflexão igual ao ângulo de incidência, como indica a Fig. 2.13).

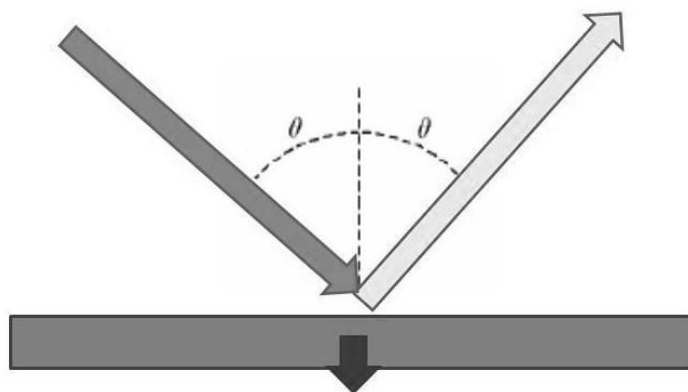


Figura 2.13: Reflexão especular. Figura modificada de Tenenbaum e Camilo, (2004)

Esse processo persiste até o nível de energia de cada raio não ser mais significativo, então a sua propagação é interrompida e inicia-se o traçado do próximo raio.

Para calcular a energia sonora em pontos distintos da sala são definidas as áreas ou volumes receptores, nos quais os raios cruzam, tal como o círculo da Fig. 2.14 mostra:

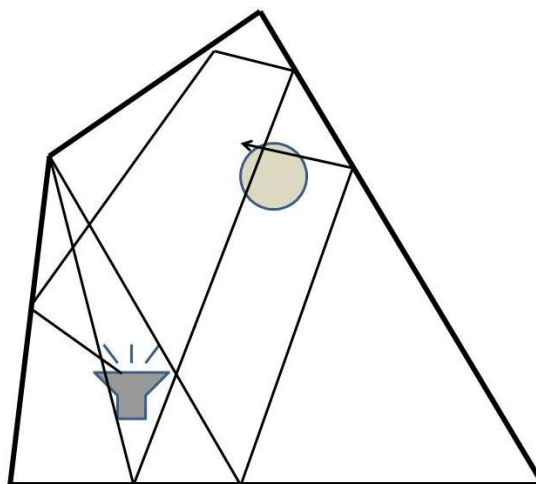


Figura 2.14: Traçado de um raio acústico da fonte ao volume receptor. Modificado de Raynoise (1993).

O número de raios cruzando o volume receptor e as contribuições de energia desses raios determinam o nível de pressão sonora. Perdas devido à divergência esféricas são incluídas como resultado da crescente separação entre os raios enquanto eles se afastam da fonte com o passar do tempo (RAYNOISE, 1993).

No caso do receptor ser representado por um ponto de recepção infinitesimal, o detector deve assumir dimensões finitas para registrar um número de raios adequado à representação da resposta impulsiva de uma posição no ambiente, por esse motivo, conforme aponta Fernandes Lopes, (2005) é preferível que o alvo possua um formato geométrico que não forneça certas direções de incidência em detrimento de outras, sendo que a aproximação geométrica da esfera aparece como a melhor opção.

A geração do sinal na fonte e a interação difusa e especular da onda com os obstáculos, representa o caminho de propagação sonora que alcanço os pontos receptores. Os sinais obtidos nesses pontos estratégicos são responsáveis por captar a energia e o tempo de chegada, que são usados para a posterior construção da RIR, Rindel (2004) e Rindel e Christensen (2009). Em situações reais, os coeficientes de reflexão apresentam dependência com relação à banda de frequência, porém, para efeito de modelagem, introduzir essa dependência para cada banda de frequência simulada, em cada ponto de colisão, gera um procedimento computacionalmente pesado. Assim, um único valor para o coeficiente de reflexão é utilizado em todas as bandas, Fernandes Lopes (2005). O resultado de um processo de raios traçados não é a RIR propriamente dita, mas sim uma distribuição temporal de energia, dessa forma, é necessário converter os ecogramas obtidos numa resposta ao impulso equivalente de pressão que possua a mesma composição temporal e espectral (KUTTRUF, 1993).

Uma vantagem do método de raios traçados reside no que se refere ao formato geométrico das paredes. Essa técnica permite simular superfícies curvas, gerando uma boa flexibilidade quando esse método é usado conjuntamente com o da fonte imagem que o adotam apenas paredes planas, (RINDEL; CHRISTENSEN, 2003) e (NAYLOR, 1993).

Muitos pesquisadores exploram essa metodologia com o intuito de fazer auralização de salas, como os já citados ODEON® e Raynoise®. Porém uma desvantagem está na precisão dos resultados obtidos com este método, que apresenta limitações devido à emissão de um número limitado de raios, o que não garante que todos os percursos dos raios entre fonte e receptor sejam encontrados, e pelas dimensões finitas do volume receptor, o que cria a possibilidade de se coletar

falsos percursos ou coletar um mesmo percurso mais de uma vez. (MORAES, 2007), (MURPHY, 2008) e (MOURA, 2005).

Fonte Imagem

Para muitos pesquisadores, sob o ponto de vista computacional, o método da Fonte Imagem também se trata de um método baseado em raios, Savioja. (1999). O princípio do método reside na substituição dos efeitos da reflexão do som, pelo aparecimento de fontes virtuais (MOURA, 2005). Em outras palavras os caminhos refletidos especularmente da fonte real são substituídos por caminhos diretos de uma fonte virtual, que é projetada com o mesmo ângulo θ por trás do obstáculo.

Tal como o método anteriormente apresentado, o raio que propaga em linha reta pode sofrer atenuação devido aos efeitos dissipativos, como a viscosidade do ar e pela atenuação da energia pelas superfícies de contorno, Moraes (2007). Ao atingir os obstáculos, a energia pode sofrer reflexão do tipo difusa e do tipo especular, conforme já discutido.

O método Fonte Imagem assume que o raio refletido pelo obstáculo será substituído por uma fonte virtual, com certa atenuação e levando em conta a distância percorrida. Tal fenômeno pode ser representado como um problema 2D de uma caixa retangular contendo uma fonte esférica no ponto Sc e um receptor no ponto Rc , tal como mostra a Fig. 2.15:

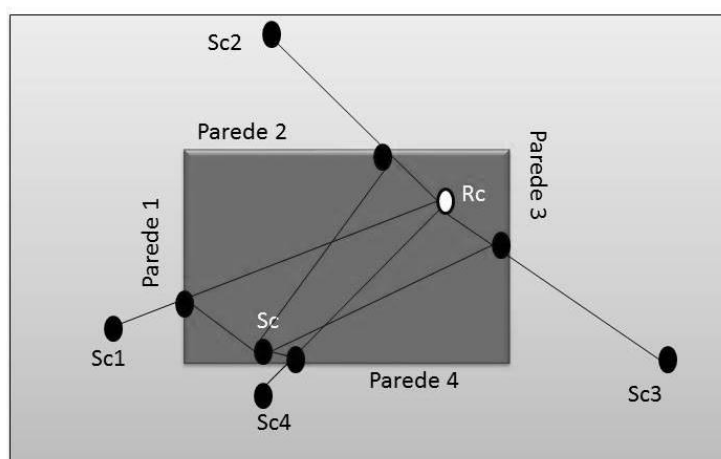


Figura 2.15: Caminho da reflexão de primeira ordem num caso bi-dimensional.

As primeiras fontes imagens são construídas com as reflexões das paredes: $Sc1$, $Sc2$, $Sc3$ e $Sc4$, conforme mostrado acima. Essas fontes são classificadas como

de primeira ordem, uma vez que sofrem apenas uma reflexão. Seguindo a mesma linha de raciocínio, são geradas as fontes de ordem superior, em função das intersecções dos raios com as barreiras, conforme é ilustrado na Fig.2.16.

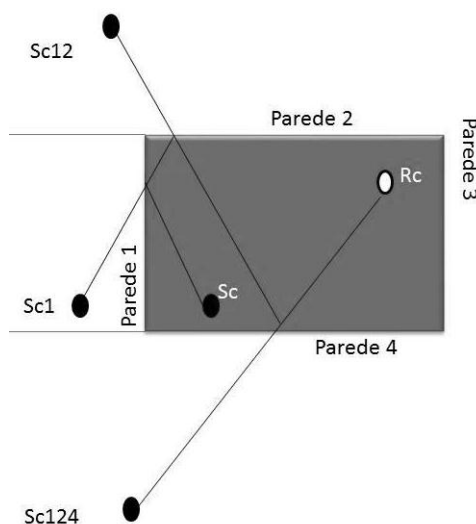


Figura 2.16: Fonte Imagem de terceira ordem e o correspondente caminho de reflexão. Imagem modificada de Raynoise, 1993)

Pela representação da Fig. 2.16, o raio oriundo da fonte Sc atinge a parede 1, gerando a fonte virtual Sc1. Posteriormente, o raio emitido por Sc1 segue em linha reta, atingindo a parede 2 e gerando Sc12. Seguindo a trajetória da propagação sonora, o raio de S12 atinge a parede 4, gerando a fonte imagem Sc124. Por fim, o raio de Sc124 segue em direção retilínea até alcançar o receptor, posicionado no ponto Rc.

Em linhas gerais, a técnica de fonte imagem é bastante semelhante ao método raios traçados e em muitas situações, são usadas em conjunto em métodos conhecidos como híbridos. Para Fernandes Lopes, (2005) trata-se de uma ferramenta robusta para o cálculo da RIR, mas apresenta limitações que devem ser compreendidas e avaliadas de acordo com a aplicação que se pretende implementar. Afinal, essa técnica se limita a modelagem de superfícies planas e maiores detalhes se encontram em (SEGURA; ET. AL, 2010), (KUTTRUF, 1993), (CHANDAK; ANTAN; MANOCHA, 2011). Em algumas situações é possível fazer aproximações de superfícies curvas por planos, mais isto, pra fins de auralização, compromete a fidelidade do ambiente virtual, Campos, (2003).

2.3.3 – Modelos Teóricos

Tal análise permite o cálculo do fluxo de energia entre estruturas ressonantes, tais como vigas, membranas e campo sonoro de ambientes reverberantes, Rindel (2003). A vantagem desse tipo de análise está na simplicidade e na possibilidade de serem calculados em bandas de oitava. As salas são descritas em parâmetros como geometria, coeficiente de absorção da superfície, além disso, é possível representar os obstáculos presentes na sala.

Dentre os métodos que exploram a curva de propagação sonora é possível destacar: Friberg, Thompson, Wilson, Modelo “E&R”, Kuttruff, Zetterling, Sergeev e Hodgson, sendo todos eles vastamente explorados em Hodgson (1990) e Hodgson (1998), que fazem a comparação entre tais modelos explorando a ausência e preenchimento imobiliário dos ambientes.

Outro tipo de análise teórica de ambientes fechados explora o tempo de reverberação, que conforme supracitado, trata-se de um fenômeno físico produzido pelas reflexões múltiplas de sons em superfícies, que dispersam o som, enriquecendo-o por sobreposição de suas reflexões. Como já comentado, a quantidade e a qualidade da reverberação que ocorre em um ambiente são influenciadas por vários fatores, tais como o volume, dimensões do espaço; o tipo, a forma e o número de superfícies com que o som se encontra. Dentre as metodologias usadas para calcular o tempo de reverberação teórico é possível citar: Equação de Sabine e Equação de Eyring, descritas pelas Equações (2.20) e (2.22), respectivamente.

Embora para muitas aplicações esses métodos sejam viáveis, eles não são indicados para a auralização de salas, uma vez que apresentam limitações no que tange a análise de salas altamente absorptivas e não consegue representar com exatidão a localização espacial de cada superfície, conforme discutido por Egan (1988) e Kaminsinski, (2010).

2.3.4 – Os Modelos Baseados no Comportamento da Onda Acústica

Os modelos baseados no comportamento da onda acústica visam à resolução numérica de um conjunto de equações governantes que regem cada fenômeno físico analisado (MOURA, 2005), (DIAS, 2009), (MALISKA, 2004). Por lidarem, em sua formulação básica, com fenômenos ondulatórios como a difração, tais métodos produzem os resultados mais precisos para as modelagens dos ambientes acústicos, (CHENG; WAKEFIELD, 2001).

A maioria dos métodos assim classificados é baseada na integração numérica da equação da onda em cada ponto da malha e requer que a distância entre os nós da malha seja no mínimo igual à metade do comprimento de onda da maior frequência do sinal, conseqüentemente, aumento do custo computacional (SMITH, 1992). Em outras palavras, a subdivisão espacial deve ser de tal forma que os comprimentos de onda possam ser avaliados com precisão dentro de um elemento discretizador, possuindo um limite superior de operação em relação à frequência.

A seguir serão apresentados alguns métodos baseados nesse modelo.

Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method – FEM*) é baseado na solução da equação de Helmholtz para elementos que discretizam todo o volume do ambiente (SAVIOJA, 2000), assim como apresentado na Fig. 2.17:

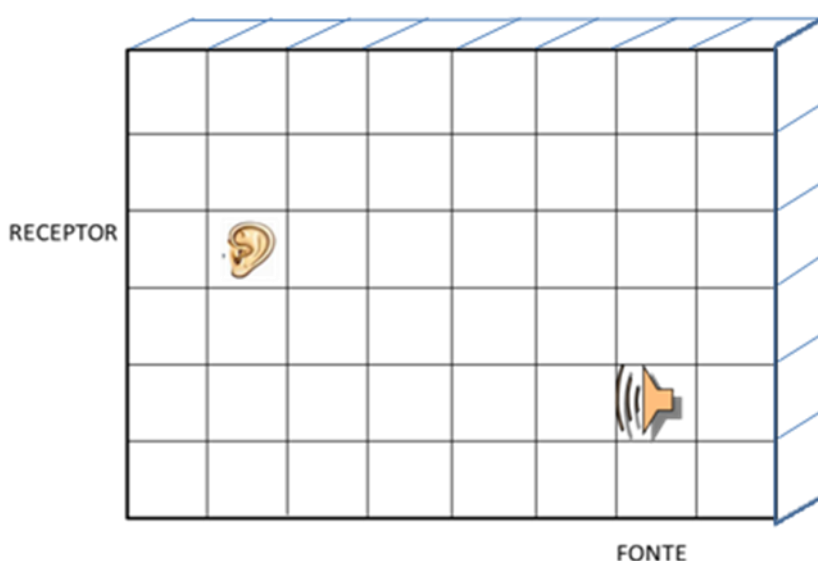


Figura 2.17: Discretização do volume do ambiente com uma fonte e um receptor representados hipoteticamente no recinto, para serem simulados através do Método de Elementos Finitos.

Em grande parte das simulações e para simplificação de cálculos, o meio é caracterizado como homogêneo. O número de elementos aumenta em função da frequência e do tamanho do recinto, acarretando num alto custo computacional. Por isso, esse método é preferencialmente adotado para pequenos espaços fechados e sinais em baixas frequências.

A grande vantagem desse método está em simular situações que demandam uma maior riqueza de detalhes, pois contempla fenômenos tais como difração, espalhamento e refração.

Para o caso particular da simulação binaural, fazem-se necessárias abordagens simplificadas, em outras palavras, o cálculo de pressões em pontos que possuam relações interaurais (distância entre orelhas) ou pressões sobre uma esfera (GRANIER; KLEINER; DALENBACK, 1996).

Elementos de Contorno (BEM)

Assim como os Métodos de Elementos Finitos, os Elementos de Contorno *BEM* (*Boundary Element Method*) são preferencialmente adotados para pequenos espaços fechados e sinais em baixas frequências, por apresentarem um elevado custo computacional, Guedes, (2007). Em ambos os métodos, uma malha de elementos é utilizada para a discretização do espaço considerado. A diferença entre os métodos reside na estrutura dos elementos, Figueiredo e Iazzetta (2006). Enquanto no modelo FEM os elementos são considerados em todo o espaço analisado, o BEM é modelado apenas nas fronteiras (nos contornos), tal como apresentado na Figura 2.18.

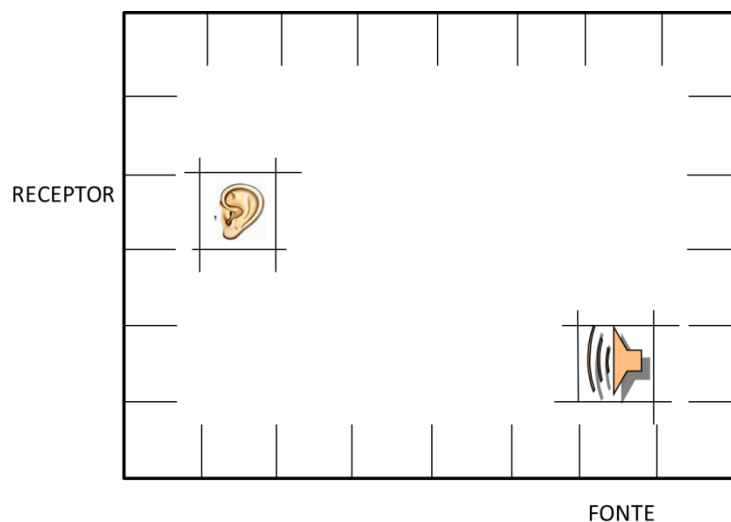


Figura 2.18: Discretização da superfície do ambiente conforme a metodologia BEM

Para essa abordagem, a equação da onda é expressa como equação de Green, (JAMES ET.AL, 2010), sendo sua formulação integral solucionada por intermédio da subdivisão das superfícies do ambiente. Desta forma, o campo sonoro, no interior de um

ambiente, pode ser construído a partir das contribuições da pressão sonora e da velocidade da partícula normal do contorno das superfícies do espaço modelado.

De acordo com Fernandes Lopes, (2005) e James et.al, (2010), a grande vantagem do BEM em relação ao FEM é que a quantidade de elementos utilizados para discretizar o ambiente é muito menor. Porém, as matrizes resultantes no BEM não são tão esparsas quanto às do FEM. Em geral, elas são menores porém mais densas e não possuem simetria que costumam facilitar as soluções numéricas.

Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

O Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo, (*Finite Difference Time Domain* - FDTD) possibilita outra forma de resolução para o problema, pois aproxima as derivadas com respeito ao tempo e ao espaço da equação da onda por diferenças finitas, (SAVIOJA, 2000), (JAMES; ET.AL, 2010), (ERKUT; MATTI, 2002) e (KAMINSISKI, 2010). Assim como o FEM, todo o volume do ambiente é considerado para que sejam efetuados os cálculos das equações.

Na técnica de diferenças finitas, a equação diferencial parcial governante é discretizada numericamente para simular a propagação das ondas sonoras e o princípio básico da metodologia reside na substituição das derivadas de primeira e segunda ordem das equações por aproximações numéricas denominadas diferenças finitas.

A formulação matemática para a propagação da onda unidimensional é discutida na Eq. (2.1). Reescrevendo-a para ser analisada no método de Diferenças Finitas, é possível obter a relação expressa pela Eq.(2.38)

$$y_{tt} = c^2 y_{xx} \quad (2.38)$$

Da Equação (2.38) y_{tt} representa a variação da pressão, com relação ao tempo t , c a velocidade de propagação no meio e y_{xx} a variação da pressão com relação ao espaço, x . A velocidade da propagação c é dada pela divisão do espaço x pelo tempo t . O esquema de diferenças finitas centradas é expresso pelas Eq.(2.39) e (2.40):

$$y_{tt} \approx \frac{y_{x,t+\Delta t} - 2y_{x,t} + y_{x,t-\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (2.39)$$

$$y_{xx} \approx \frac{y_{x+\Delta x,t} - 2y_{x,t} + y_{x-\Delta x,t}}{\Delta x^2} \quad (2.40)$$

Nessa formulação as variáveis temporais e espaciais podem ser escritas de acordo com as Eq. (2.41) e Eq. (2.42), respectivamente.

$$dx = \frac{x}{\Delta x} \quad (2.41)$$

$$dt = \frac{t}{\Delta t} \quad (2.42)$$

Da Equação (2.41) x corresponde ao espaço e Δx a variação de espaço. Na Equação (2.42), t corresponde ao tempo e Δt a variação de tempo. Devido ao caráter hiperbólico da equação, os intervalos de tempo e espaço não podem ser escolhidos aleatoriamente, sendo necessário um critério de estabilidade, que só é válido para condições explícitas. A condição de estabilidade proposta por Von Neumann é expressa pela Eq. (2.43) (ERKUT; MATTI, 2002):

$$c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (2.43)$$

É importante deixar bem claro que esse tipo de metodologia consegue simular com sucesso um meio de propagação ideal, diferente dos que existem na realidade, com superfície irregular ou meio não homogêneo, por exemplo.

Guias Digitais de Ondas

Outra metodologia muito difundida são as Guias Digitais de Ondas (*Digital Waveguide*), que podem ser, matematicamente, classificadas como um caso particular dos Métodos de Diferenças Finitas. Porém se distinguem no que diz respeito à derivação das equações, condições de contorno, dentre outras características (SMITH, 1992).

A grande vantagem reside em sua formulação simples e eficiente, pois é baseada na solução da equação da onda proposta por d'Alembert, que trabalha em regime unidimensional. As geometrias analisadas são formadas por juntas de dispersão (ponto em que as guias se cruzam para formar a malha) e simuladas usando apenas o *delay*, atraso temporal para que a informação que estava no ponto anterior chegue ao ponto atual. Além disso, cada junta comunica-se com os nós vizinhos, realizando assim, a propagação do sinal através da malha.

Um fator que deve ser levado em conta no momento da simulação é quanto ao erro de dispersão, que se trata do erro do posicionamento dos nós na malha em função da velocidade de propagação inserida na análise. O problema pode ser contornado ao se aumentar a densidade da malha, que é determinada pela distância internodal e que por sua vez está diretamente ligada à frequência de amostragem dos sinais de áudio (CAMPOS, 2006). Dessa forma, quanto maior for a densidade da malha, melhor será a resolução, em contrapartida, maior será o gasto computacional.

Esse trabalho visa investigar a potencialidade da técnica na simulação de ambientes reverberantes, com o intuito de obter parâmetros da qualidade bem como a auralização desses locais. Por se tratar da metodologia adotada nesse trabalho, o Capítulo 4 será destinado a esse assunto especificamente, abordando a fundamentação teórica, formulação matemática e topologias de malhas das Guias Digitais de Ondas.

CAPÍTULO III

Auralização de Salas

O capítulo anterior fez um levantamento acerca das técnicas previsionais capazes de estimar a geração e propagação sonora. Dentre os resultados das análises supracitadas, é possível mencionar: informações referentes à pressão sonora em determinado ponto e parâmetros específicos relacionados à sala acústica. Contudo, segundo Vorlander (2008) sugere, todas essas informações não são capazes de caracterizar completamente a acústica de um determinado recinto.

No intuito de aprofundar sobre o tema, esse capítulo se destina a conceituar o termo auralização, além de fazer um levantamento histórico até alcançar o atual estado da arte dos processos de auralização computacional. A descrição detalhada da cadeia de auralização binaural, abordando as técnicas usadas para estimar a Resposta Impulsiva da Sala RIR (*Room Impulse Response*) e a Resposta Impulsiva da Sala BRIR (*Binaural Room Impulse Response*) também se fazem presentes, assim como conceitos referentes à teoria dos sinais, fundamentais para o processo de auralização encerram esse capítulo.

3.1. Auralização

Carvalho (2013) afirma que as análises de engenharia são geralmente quantidades numéricas apresentadas em termos de gráficos e tabelas. Entretanto, em acústica, esta forma de avaliar o problema apresenta certa limitação, tal como ocorre ao explicar os traços de uma pintura para uma pessoa que não tem acesso a

visualizá-la. A caracterização verbal seria baseada em alguns descritores tais como: tamanho, cor, brilho, dados sobre os objetos ou mesmo a resolução de alguns de seus detalhes. Entretanto, a reprodução desta pintura de acordo com descrições verbais nunca será capaz de descrever fielmente o original, uma vez que sempre estará revestida de interpretações subjetivas dos participantes, ainda que os descritores sejam parâmetros objetivos (VORLANDER, 2010). Nesta situação fica muito claro que seria mais assertivo se simplesmente a pessoa pudesse visualizar diretamente a pintura, apreciá-la, e assim tirar suas próprias conclusões, sem intermediários, (CARVALHO, 2013).

Segundo, Rindel e Christensen (2009), a auralização ou simulação binaural de ambientes oferecem a possibilidade do uso dos próprios ouvidos para escutar a acústica de um determinado ambiente ainda durante a fase de projeto. Nesse sentido, a auralização oferece uma extensão importante para a predição, análise e síntese acústica.

De acordo com Lokki, (2002), Lokki et.al (2002), Bos, Embrechts (2009) o processo de auralização é fruto da contribuição de áreas interdisciplinares, sendo necessário compreender o fenômeno ondulatório, principalmente, no que diz respeito à propagação das ondas sonoras dentro de recintos, onde são submetidos a fenômenos, tais como transmissão, absorção, reflexão, entre outros.

Embora a ideia seja relativamente antiga, o termo auralização propriamente dito só foi introduzido por Mendel Kleiner no ano de 1989, na convenção anual da Sociedade de Engenharia de Áudio, AES, (JÚNIOR, 2005). Conforme o próprio autor define (KLEINER, 1993), o termo auralização trata-se de uma palavra análoga à visualização no que se refere à capacidade de “antevisão” da acústica de um ambiente sem que se esteja ou sequer que ele exista. Nesse ponto cabe ressaltar que alguns pesquisadores preferem denominar tal processo de Síntese Sonora.

Por definição, auralização é o processo de renderizar de forma audível, através de modelagem física ou matemática, o campo sonoro de uma fonte em um espaço, de forma a simular a experiência auditiva em uma determinada posição no espaço modelado, (KUTTRUFF, 1993). Para Vorlander (2010), trata-se de uma técnica para criação de arquivos sonoros audíveis a partir de dados numéricos, tais dados podendo ser simulados, medidos ou sintetizados. Isso permite criar um campo sonoro audível através da modelagem física ou matemática da fonte sonora, do ambiente e do ouvinte. Farina (2007) descreve a auralização como um processo de filtragem de um sinal anecóico capaz de ser reproduzido no ouvido dos ouvintes propiciando

sensações psicoacústica de um espaço sonoro, incluindo reverberação e impressão espacial. Nesse tipo de abordagem, os pulsos sonoros, emitidos pela fonte sofrem influência da absorção do ar, das características das condições de contorno e dos tempos necessários para que os raios refletidos alcancem os receptores, (SOUTHERN; SAVIOJA, 2012). No que tange à área de realidade virtual, a auralização pode aumentar significativamente a sensação de imersão, provendo a interação precisa em ambientes virtuais pela interação entre o áudio e as informações visuais. Além disso, (SAVIOJA; LOKKI; HUOPANIEMI, 2002), (SAVIOJA; MANOCHA; LIN, 2010), Lokki e Savioja (2005) ainda acrescentam, que trata-se de um campo interdisciplinar, cuja implementação requer compreensão e entendimento em acústica de salas, processamento de sinal e psicoacústica.

Primordialmente, o objetivo dessa tecnologia não é recriar a sensação da fala, da música ou de qualquer outro sinal de interesse relevante, e sim recriar a impressão aural das características acústicas de um espaço, seja ele fechado ou aberto, que estão codificadas na informação emitida, e é possível ser feita em ambiente utilizando modelos em escala ou modelagem computacional para a obtenção da BRIR ou funções de transferência, (TAYLOR et al., 2012).

A grande vantagem desse método reside na possibilidade de recriar e ouvir a impressão aural das características acústicas de um espaço, em outras palavras, simular o posicionamento de fontes sonoras em diferentes pontos do ambiente, mudar a geometria e realizar tratamentos na trajetória, bem como simular os movimentos corpóreos do ouvinte, tudo isso apenas mudando alguns parâmetros de entrada para o sistema de simulação. Como principais preocupações da metodologia, concentram-se a fidelidade sonora e a captação das características acústicas do local.

Com o intuito de fazer uma contextualização histórica das pesquisas em auralização, será destacado no tópico a seguir os principais pontos relevantes e as contribuições das diversas pesquisas para o crescimento dessa área.

3.2 – Histórico

As pesquisas em auralização começaram na primeira metade do século passado, quando Spandock e equipe tentaram modelar uma sala para aferir a performance da fala e música em modelos de escala reduzidos. Primeiramente

usaram modelos físicos em escala de 1:5 e posteriormente em escala de 1:10. Na ocasião eles usaram um método denominado gramofone, (FERNANDES JÚNIOR, 2005). O método consistia, inicialmente, na gravação de um sinal anecóico num cilindro de cera. Esse então, era reproduzido no modelo reduzido, por intermédio de um alto-falante, com a velocidade de reprodução ajustada para um valor 5 vezes maior que a de gravação, pois a escala de redução era de 1:5. O som, no modelo, era captado com a mesma velocidade de rotação que foi inserido, ou seja, com uma velocidade 5 vezes maior do que o sinal original. Para ouvir o som reproduzido como se o ambiente tivesse as proporções reais, eram utilizados fones de ouvido, reproduzindo a amostra de áudio numa velocidade 5 vezes mais lenta para obter a impressão do evento auditivo. Como resultado, a inteligibilidade da fala foi comparada entre o modelo de escala e a sala real.

Com o avanço da eletrônica e da própria computação nas décadas posteriores, houve um salto significativo nas pesquisas em auralização, propiciando novas abordagens. Vorlander (2008) destaca a importância de Krostad, Strom e Sordal, que ainda nos anos 60 discutiram sobre simulações em computador especializado em acústica de salas.

No final dos anos 80, numa tentativa de modelar salas acústicas e realizar auralização binaural de salas de concerto, a equipe do centro francês *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* propôs simular separadamente os tempos de reverberação inicial e tardia, conforme é discutido por Martin (1993), Martin e Vian (1989) e Vian e Martin (1992).

Durante os anos 90, as pesquisas na *Chalmers University of Technology*, da Suécia, se intensificaram na modelagem e reflexões, bem como nos métodos de auralização, convergindo para o programa CATT Acoustics®, conforme é descrito em maiores detalhes por Rindel (2000). Baseado na modelagem geométrica da sala, inúmeros trabalhos exploram esse sistema. Pesquisas mais recente abordam a influência dos coeficientes de difração (SHTREPI; ASTOLFI, 2011), bem como fazem um comparativo entre outras técnicas, assim como os trabalhos de Puglisi (2012), Ramakrishnan e Dumoulin (2011). Além disso, outros trabalhos fazem o levantamento em diferentes tipos de construções, como salas de teatro e concerto, (KAMINSINSKI, 2010), sendo simulados inclusive leitos hospitalares, (XIE; JIAN, 2012).

Iniciada na última década e usando algoritmos baseados na geometria, tais como *Ray Tracing* e *Beam Tracing*, pesquisadores da *Technical University of*

Denmark, realizaram pesquisas para a modelagem e auralização de ambientes, obtendo como resultado o software Odeon®, que atualmente é capaz de prever o comportamento acústico de espaços públicos, auditórios e ambientes industriais, bem como o controle de ruído (PETERS et. al, 2011). Sendo especialmente explorado para avaliações de igrejas nos trabalhos de Boren (2011), Santana (2009) e salas de aula Awad et al. (2012).

Já na Itália, mais precisamente, os cientistas da *Unerstà di Parma*, conceberam o software RAMSET®, focado na acústica automobilística e auralização de salas (BURATTI; MORETTI; VERGONI, 2009). Essa técnica consiste num sistema numérico capaz de simular com precisão a propagação sonora em ambientes de grande dimensão e levando em consideração fontes do mundo real, através da técnica de traçados piramidais (FARINA, 1995). Além disso, há trabalhos que exploram especificamente a auralização de salas, como Farina e Righni (1997) e Southern; Siltanen; Lauri (2011).

Outro software bastante difundido e que segue os mesmos paradigmas dos sistemas apresentados até então, trata-se do Digital Interactive Virtual Acoustics – (DIVA®), implementado na *University of Technology* da Finlândia. Uma funcionalidade do DIVA® é a capacidade em fazer a auralização em tempo real para o usuário, causando grande impacto nas pesquisas em Realidade Virtual, pois permite ao usuário a sensação de imersão no ambiente virtual, (SOUTHERN; SAVIOJA, 2012). A metodologia, especialmente em auralização, é amplamente explorada nos trabalhos de Bos e Embrechts (2009) e Chandak, Antani e Manocha (2011).

O programa EASE® (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) trata-se de outro programa para predição acústica e bastante voltado para as pesquisas em realidade virtual, uma vez que permite uma modelagem mais voltada para visualização. Como os demais programas apresentados, integra a funcionalidade de auralização que permite renderizar o som ouvido numa dada posição da maquete ou via modelo arquitetônico concebido por computador, como plantas em AUTOCAD®, por exemplo, Siltanen; Lokki; Savioja (2010), Buettner (2010) e Lokki e Savioja (2009).

No Brasil, pesquisadores da Universidade de São Paulo elaboraram o sistema AcMus®, que trata-se de um software para modelagem acústica de salas (IAZZETA; FIGUEIREDO; MASIERO, 2004), (MASIERO; IAZZETTA, 2005) e (MASIEIRO, 2004) e na auralização de salas (TÔRRES, 2008). Além disso, na Universidade Federal do Rio de Janeiro foi desenvolvido o RAIOS®, (TENEBAUM; COELHO, 2002),

(TENEMBAUM; CAMILO, 2004), (MELO ET.AL, 2007), (CAMILO, 2004) que também é baseado na metodologia geométrica.

De acordo com Faria (2005), os programas comerciais são encontrados para várias plataformas (versões Windows e distribuições Linux) e frequentemente importam ou exportam arquivos em diversos formatos, particularmente os formatos compatíveis com AUTOCAD®. Nos últimos anos, muitas pesquisas vêm sendo realizadas (VÖRLANDER, 2008), (RINDEL, 2000), (BRIGGS; OLEG, 2009) e (MELO, 2007), a fim de verificar a confiabilidade dos programas de simulação acústica e aprimorar os métodos híbridos para o cálculo de parâmetros utilizados na avaliação da qualidade acústica de salas. Os resultados têm mostrado que a ferramenta numérica é bastante confiável para diversos modelos e dimensões de salas.

Conforme o levantamento acerca dos softwares para auralização existentes aponta, o processo de auralização é praticamente indissociável dos algoritmos de reverberação. Para Lokki (2002) há uma forte relação entre os algoritmos de reverberação e a auralização, uma vez que o objetivo dos projetos de reverberação é similar aos sistemas de auralização, no sentido de modelar o decaimento do campo sonoro através de reflexões, em outras palavras, os algoritmos de reverberação podem ser modelados a partir de modelos físicos ou sob o ponto de vista da percepção.

O primeiro a implementar os algoritmos de reverberação inteiramente digital foi Schroeder, em meados dos anos 60. De acordo com Guedes (2007) tais algoritmos são capazes de medir o tempo de reverberação usando ruídos impulsivos, como tiros filtrados de pistola, para excitar um enclausuramento, obtendo curvas de decaimento. Maiores detalhes sobre como obter a resposta impulsiva serão apresentados na sessão 3.3.1.

3.3 – Cadeia de Auralização de Salas

O princípio de auralização é mostrado na Fig. 3.1, que mostra os elementos básicos para a geração do som, transmissão, reprodução do som. Rindel e Christensen (2009) apresentam de forma didática, a cadeia de auralização, que considera suposições, aproximações e cálculos que abrangem desde a fonte até o receptor.

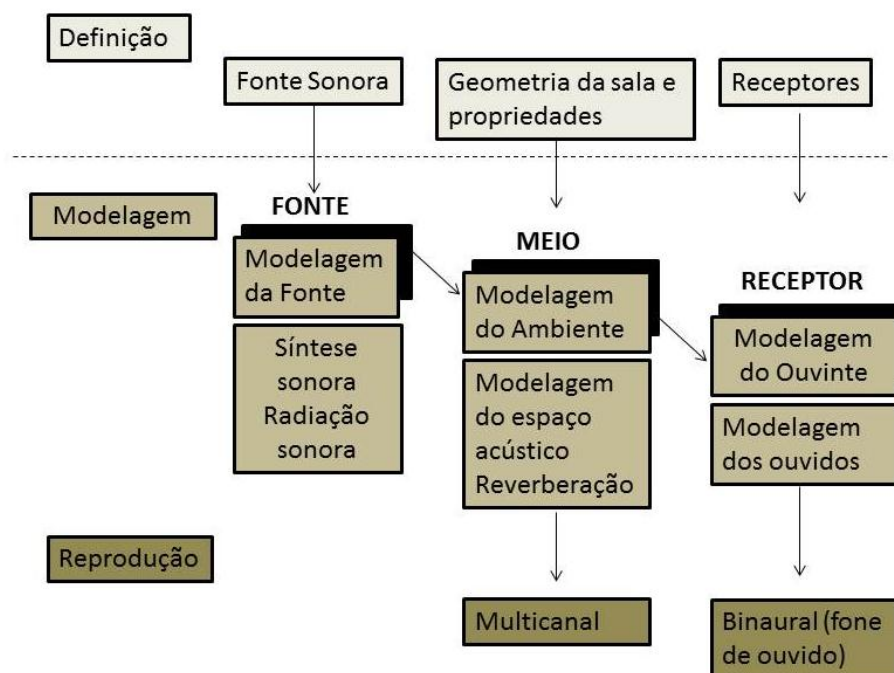


Figura 3.1.:Etapas da auralização de salas. Cadeia de auralização: modelagem da fonte-meio-receptor para auralização. Figura modificada de (SAVIOJA; LOKKI, 2002)

A fonte é o dispositivo responsável por inserir energia no sistema, (SAVIOJA , 2000). Esse sinal primário que pode ser gerado ou gravado deve ser apresentado através de sua amplitude, como por exemplo, em unidade de pressão sonora. Geralmente é expressa em função do nível de potência e da diretividade, que sofrem influência da banda de frequência. Devido à capacidade de radiar energia isotropicamente, as fontes do tipo pontual são muito difundidas nos processos de auralização.

Algumas análises de fonte consideram instrumentos musicais propriamente ditos como pontos de fonte sonora. Nesse sentido, se por ventura o músico for levado em consideração é necessário caracterizar a direcionalidade sonora, em virtude da interferência do músico. Como as características direcionais dos instrumentos musicais podem mudar rapidamente de um tom para o outro, é aconselhável analisar em bandas de oitava, conforme sugerem (OTONDO; RINDEL, 2005).

O meio de propagação é responsável por extrair as características do ambiente sonoro no tempo e no espaço. Particularmente, para um meio fechado ou semi-fechado, ocorre o princípio da reverberação, devido às várias reflexões que ocorrem com o som, enriquecendo o sinal que alcança o ponto receptor, (HODGSON, 1990).

Há muitos algoritmos que permitem a simulação do campo reverberante de um ambiente submetido à resposta impulsiva. Matematicamente, a propagação sonora é descrita pela Equação da Onda ou Equação de Helmholtz, Eq (2.1).

Nesse passo há um interesse particular na reflexão sonora, bem como na dispersão das ondas ao colidirem com os obstáculos. A simulação da resposta impulsiva do ambiente pode ser feita através de métodos geométricos, que são baseados na acústica geométrica (FARIA, 2005), ou no comportamento da onda sonora, conforme discutido no Capítulo 2. Os programas de simulação se utilizam desses métodos previsionais para simular o comportamento acústico de um ambiente fechado.

A criação do modelo da sala e especialmente a quantidade de detalhes geométricos tem um impacto no realismo e qualidade das simulações acústicas. Nos dias atuais, é possível acessar muitos detalhes em modelos tridimensionais. Entretanto, Siltanen, et. al (2008) fazem uma discussão a respeito de quão rico em detalhes o modelo deve ser no que tange a qualidade da simulação acústica, pois segundo os autores, muitos detalhes podem fazer do modelo menos usual para a proposta acústica.

O receptor, assim como a fonte, sofre influência do seu posicionamento no recinto, interferindo na informação que neles chegam. Isso ocorre em virtude da frequência do sinal, em outras palavras, devido à variação do comprimento de onda. Dessa forma, desde os primeiros modelos de auralização, os esforços se concentraram na modelagem do receptor, em particular, na sua localização e na apresentação dos resultados. Segundo, Rindel e Christensen (2009) caso os resultados sejam apresentados em alto-falantes é necessário recorrer à técnica da Função de Transferência Relacionada à Cabeça (*Head Related Transfer Function* – HRTF).

Além disso, com a distância que o som tem que viajar (entre a fonte e receptor) ou a presença de obstáculos, pode ocorrer o mascaramento sonoro. Quanto à característica aural, é possível classificar os receptores como binaural (fones de ouvido) e transaural (auto-falantes), (FIGUEIREDO, 2005).

Outra característica intrínseca do receptor é a diretividade, imposta pelo conjunto tímpano, canal auditivo, orelha externa, cabeça e torso, aos sinais que alcançam o ouvinte (BLAURETE, 1997).

O resultado dessa cadeia de auralização será a transmissão do sinal de pressão sonora que pode ser considerada perceptível e lida pelos reprodutores

sonoros, como os fones de ouvido. Uma convolução dessa função transferência com um sinal anecóico terá como resultado um sinal de áudio que pode ser apresentado através de fones de ouvido ou por alto-falantes.

3.4 – Auralização Binaural

Num processo de auralização, existem diferentes métodos para a síntese de áudio, que são classificados segundo a técnica de renderização ou a maneira em que produto final será apresentado, em outras palavras, se a reprodução será bi-aural ou multicanal (JÚNIOR, 2005).

A base fundamental para reprodução bi-aural foi introduzida por *Lord Rayleigh*, séculos atrás (ELORZA, 2005). Na ocasião, *Lord Rayleigh* constatou a influência que os dois canais auditivos provocavam na percepção da diretividade do som. Isso ocorre porque a informação que chega aos dois ouvidos possuem Diferenças Interaural no Tempo, (*Interaural Time Difference* – ITF) e Diferença Interaural de Amplitude, (*Interaural Level Difference* (ILD)). Como consequência, qualquer que seja a mistura de fontes sonora, o mapeamento final converge para os dois canais auditivos: o esquerdo (H1) e o direito (H2), conforme indica a Fig. 3.2.

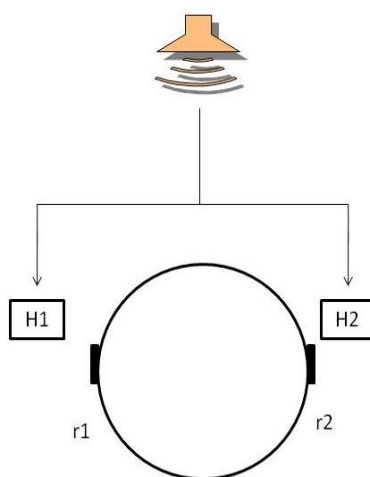


Figura 3.2: Representação da recepção binaural.

Já a reprodução multicanal é caracterizada pelo mapeamento para múltiplos canais, isso implica na renderização para matrizes de alto-falantes. Esse último caso é mais indicado para emular ambientes acústicos reais e para mais de uma pessoa

simultaneamente, assim como ocorre na natureza e sem a necessidade de utilizar fones de ouvido, (AWAD, et. al, 2012).

Um quadro comparativo entre os métodos de auralização bi-aural e multicanal é apresentado por (FARIA, 2005). Segundo o autor, no item estabilidade, o bi-aural sai em vantagem por apresentar estabilidade do ouvinte e da audição indiferente à posição do fone no ambiente, enquanto que para o multicanal, apresenta estabilidade apenas em região limitada no ambiente. Além disso, o bi-aural apresenta um custo mais baixo, uma vez que não é necessário dispor de câmeras anecóicas ou especialmente tratadas, além de não onerar o projeto com o custo das caixas acústicas.

Em contrapartida, no mesmo trabalho, Faria (2005) apontou muitas vantagens ao sistema multicanal, como por exemplo: o alcance simultâneo a múltiplos ouvintes; não ser necessário usar os fones de ouvido, acarretando numa liberdade de movimentação dentro do volume de audição; além de proporcionar uma experiência semelhante do campo entre ouvintes diferentes.

Para Vorlander, (2008) a síntese binaural é a chave de muitas metodologias de auralização e realidade virtual, e essa análise será a abordagem feita por esse trabalho. A tecnologia binaural se refere ao conjunto de técnicas de gravação e reprodução das pressões acústicas presentes nos tímpanos para recriar um evento auditivo, sem que haja diferença de localização espacial e timbrais entre o que foi gravado e será reproduzido, (JÚNIOR, 2005). A técnica bi-aural usa dois sensores (microfones) da mesma forma que em uma gravação estéreo convencional, porém são posicionados dentro das orelhas, separados por aproximadamente quinze centímetros em direções opostas, apontando ao longo do eixo invisível que transpassa a cabeça.

3.4.1 Cálculo da Resposta Impulsiva da Sala (RIR – Room Impulse Response)

Segundo Vorlander (2008), os sistemas acústicos de transmissão sonora podem ser aproximados por Sistemas Lineares Invariantes no Tempo (SLIT). A grande vantagem é que sistemas assim classificados podem ser caracterizados através da Resposta Impulsiva (*Impulse Response – IR*) medida num determinado ponto do recinto. Romeiro (2011), acrescenta que a Resposta Impulsiva é um elemento fundamental caracterizar um espaço acústico.

A resposta impulsiva trata-se da resposta que um sistema apresenta em sua saída quando submetido a um estímulo do tipo impulsivo e através dela é possível

determinar as principais características do sistema que a gerou, (FIGUEIREDO; IAZZETTA, 2006), (RAO; LIANG, 2009). Para Masiero (2004), a resposta impulsiva propriamente dita é definida como a resposta de um sistema a um impulso ideal (função Delta de Dirac).

Fisicamente, a resposta impulsiva de um uma sala descreve a energia gerada pela fonte sonora e que alcança o receptor. Por definição, a IR acústica é medida em pares de emissor-receptor, e na acústica de salas, a IR obtida entre um receptor e um emissor caracteriza o sistema acústico entre a localização exata desses dois itens, mas essa IR não pode ser usada para caracterizar a resposta impulsiva da sala como um todo (MASIERO; IAZZETTA, 2005). Em outras palavras, há uma relação de dependência da posição entre os receptores e a fonte, isso significa que uma vez que a energia que alcança os receptores pode ser oriunda apenas da fonte, como também das reflexões. A determinação precisa desse atributo pode ser integrada no processo de auralização (SEGURA et. al, 2010).

A resposta impulsiva de sistemas acústicos é adquirida através de medições envolvendo a geração, captação e armazenamento de um sinal sonoro que é posteriormente processado para fornecer as informações desejadas, (FIGUEIREDO; IAZZETTA, 2006). A maioria dos parâmetros de qualidade acústicas discutidos na sessão 2.2.1 é determinada a partir de cálculos que envolvem a resposta impulsiva. Assim sendo, faz-se necessário o uso de técnicas previsionais, bem como técnicas de medição da resposta suficientemente confiáveis, sendo capazes de aumentar a precisão de tais parâmetros.

Ao calcular a função transferência da sala, através do cálculo da resposta impulsiva, é possível modelar a acústica de uma determinada sala, inferindo na interação das ondas sonoras com os obstáculos e computando quais as mudanças que este processo impelirá a este campo sonoro em um dado ponto do espaço em estudo. Além disso, a medida ou simulação da BRIR permite obter informações sobre a percepção relacionada a pistas do receptor num determinado ponto do recinto.

Métodos de Medição Acústica de Salas

De forma experimental, uma das alternativas para obter a RIR, está em utilizar métodos que empregam excitação por impulsos, tal como a explosão de uma bexiga ou mesmo o disparo de um tiro, situações ilustradas na Fig. 3.3. A vantagem desse

método é que o espectro contém todas as frequências de interesse (FIGUEIREDO; IAZZETTA, 2006).



Figura 3.3: Fontes sonoras impulsivas. Figura obtida em Farina (2007).

O impulso criado de forma analógica, como apresentado na Fig. 3.3, possui baixa repetibilidade. Uma estratégia usada para contornar esse empecilho, consiste em gravar o sinal gerado de modo digital e ser posteriormente convertido num sinal analógico. O áudio obtido é gravado digitalmente, empregando gravadores portáteis ou mesmo computadores com placas de aquisição. Geralmente, o sinal adquirido já está apto para ser analisado, sem ser necessário o pós-processamento. Maiores detalhes sobre a técnica estão disponíveis em (FARINA, 2007)

A técnica de geradores de *Maximum Length Sequence* (MLS) que foi introduzida por Schroeder, nos anos 70, também é bastante difundida. O método MLS utiliza um grupo especial de ruídos como sinal de excitação, as sequências pseudo-aleatórias de máximo comprimento, que são semelhantes ao ruído branco. O sinal do MLS pode ser autocorrelacionado com a função do tipo Delta de Dirac e os sinais gravados contendo MLS podem ser emitidos por alto falantes. Depois disso, a RIR pode ser calculada pela correlação cruzada da medida de saída e uma determinada entrada (sequência MLS) (GUY-BART; JEAN-JACQUES, 2002), em outras palavras, entre MLS e sua gravação.

A análise pela Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform-FFT*) permite realizar medições acústicas durante uma apresentação musical, usando como sinal de excitação a própria melodia, desde que esteja sendo reproduzida eletronicamente, que está sendo executada no recinto (MASIERO, IAZZETTA, 2005). A obtenção da Resposta Impulsiva é feita comparando o espectro do sinal antes de ser enviado ao ambiente com um sinal capturado na sala. Divide-se o espectro (deconvolução no domínio do tempo) do sinal capturado pelo espectro do sinal enviado.

A varredura logarítmica por sua vez, trata-se de outra tendência a ser usada como sinal de excitação, por apresentar boa distribuição da energia em seu espectro (espectro rosa) para aplicações acústicas, (BOREN, 2011).

No âmbito computacional, existe um conjunto de técnica de modelagem acústica que podem ser utilizadas, cada qual com suas vantagens e limitações, (ROMEIRO, 2011). Os métodos mais precisos para obter a IR são aqueles baseados na solução da equação da onda, tais como os métodos, FEM, FDTD, (SEGURA et. al, 2010). Eles apresentam bons resultados em bandas de frequência e segundo Southern; Siltanen; Lauri (2011), os mesmos oferecem muitas vantagens no que diz respeito à estabilidade das aproximações geométricas, incluindo a simulações de difração e oclusão sonora. Em contrapartida, apresentam um custo computacional elevado. Sob outra abordagem, os algoritmos geométricos apresentam muitas limitações, embora sejam muito difundidos em sistemas já apresentados, tais como o DIVA[®], ACmus[®], por exemplo.

Conforme já discutido, numa abordagem geométrica, as ondas sonoras são interpretadas como raios sonoros, cuja propagação obedece às leis da óptica geométrica, considerando-se apenas a reflexão e absorção. Na Fig. 3.4 são apresentados: o esquema de excitação (a partir do ponto emissor) e a propagação sonora, que é representada pelos raios que alcançam o ponto receptor. Ainda na Fig. 3.4 é possível observar um gráfico relacionando a energia recebida ($x(t)$) ao longo do tempo (t), representando a RIR obtida. Romeiro, (2011) ressalta que apesar dessa abordagem ser relativamente pouco exigente do ponto de vista computacional, trata-se de uma técnica pouco rigorosa e extremamente simplificada (condicionadas às altas frequências).

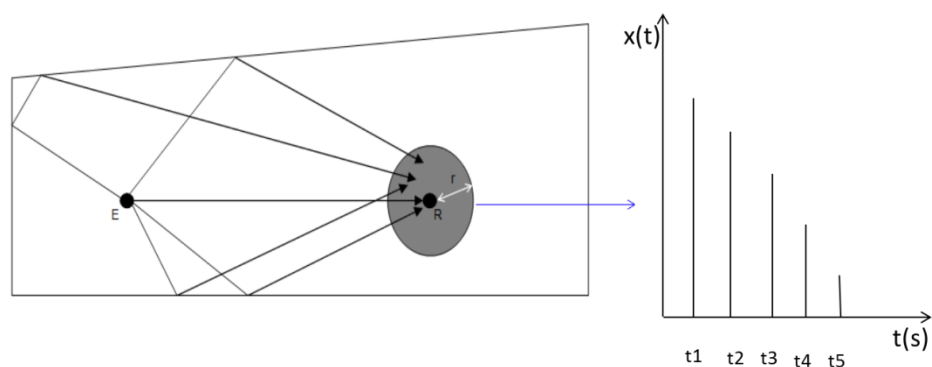


Figura 3.4: Obtenção de RIR por *Ray Tracing*.: E – Emissor; R – Receptor; r_r – Raio da zona de recepção.

Já nos modelos baseados no comportamento da onda, é realizada a discretização da equação da Onda (Eq.2.1) e os nós das malhas geradas são pontos responsáveis por captar as informações de pressão sonora, que é transmitida regendo as leis da propagação sonora. Num determinado ponto é feito a injeção de energia (representando uma fonte do tipo pontual) que se propaga através dos nós da malha até alcançar os pontos receptores. A Figura 3.5 mostra uma representação da malha do tipo quadrada, usadas nas técnicas de Guias Digitais de Ondas, que será discutida em detalhes no Capítulo 4.

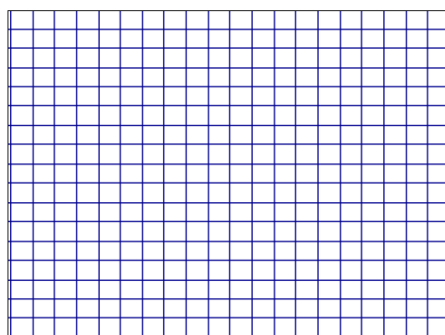


Figura 3.5– Representação da malha do tipo quadrada das Malhas de Guias Digitais de Ondas, usada para a simulação de salas acústicas.

Os trabalhos de Beenson; Moore; Murphy; Shelley (2008) e Southern; Siltanen; Lauri (2011) exploram a diferença entre os tempos computacionais dos métodos baseados no comportamento da onda sonora e dos baseados na geometria, em especial, as Guias Digitais de Ondas e os Raios Traçados.

Em Southern; Siltanen; Lauri (2011), particularmente, uma geometria de teste é definida com um volume de aproximadamente 27 [m³], tal como apresentado na Fig. 3.6 e as medidas de pressão são feitas em 359 pontos.

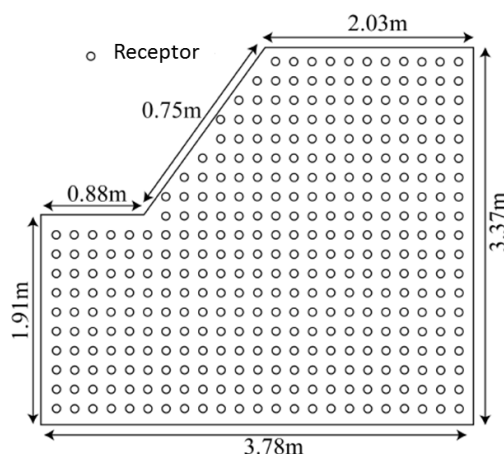


Figura 3.6;. Configuração do ambiente de teste, figura obtida em Southern; Siltanen; Lauri (2011)

A Tabela 3.1 faz uma compilação dos resultados obtidos por Southern; Siltanen; Lauri (2011), nela é possível constatar o tempo de processamento gasto para medir as RIR's.

Tabela 3.1: Comparação da performance entre o conjunto de RIR gerado pela técnica de Raios Traçados e Modelos baseados na Propagação da Onda. O tempo é expresso como (horas:minutos). Tabela Obtida em Southern; Siltanen; Lauri (2011).

	Raios	Baseados em Ondas (2D)	Baseados em Ondas (3D)
Único receptor	0:13	0:37	14:18
359 Receptores	70:00	00:37	14:18

Note que o tempo de processamento do modelo baseado no comportamento da onda não sofreu influência, quanto ao número de pontos receptores, contrastando com os modelos geométricos. Maiores detalhes quanto aos testes, discussão de resultados estão disponíveis em Southern; Siltanen; Lauri (2011).

Uma maneira de se obter uma aproximação da resposta impulsiva, em modelos computacionais, é através de uma aproximação da função Delta de Dirac (BENDAT; PIERSOL, 2000). Num experimento numérico é possível injetar energia no sistema através de um sinal do tipo meia onda de um tom puro, que é a abordagem feita neste trabalho. A Figura 3.7 mostra tal excitação gerada numa malha de guias digitais de ondas.

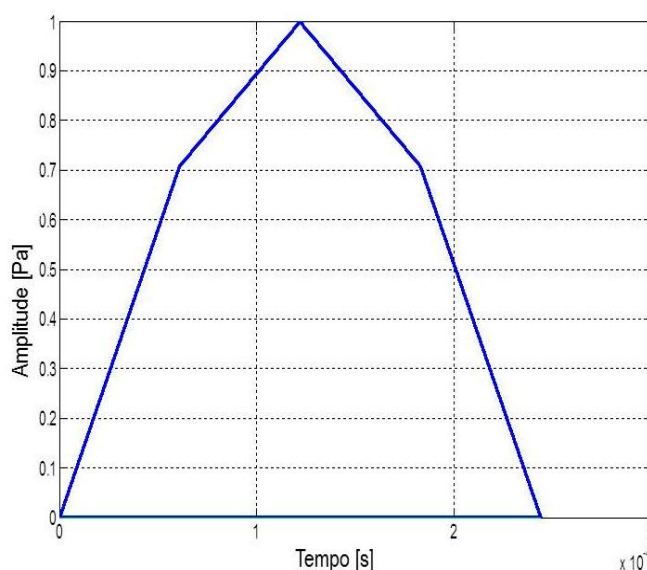


Figura 3.7: Representação hipotética do sinal emitido pela fonte.

Nessa situação (Fig.3.7) o sensor foi posicionado sobre a fonte e captou a informação durante 0.2 [s]. A frequência de excitação foi de 4096 Hz e o tempo de ativação da fonte foi da ordem de 2.10^{-4} [s], tempo necessário para completar meio ciclo do sinal senoidal.

3.4.2. Cálculo da Resposta Impulsiva Binaural (BRIR – Binaural Room Impulse Response)

A BRIR pode ser considerada como uma assinatura da resposta impulsiva para uma fonte sonora particular e um receptor humanonaural (KLEINER, 1993). Para Rindel e Christensen (2009), se trata do ponto de chave para auralização. Uma das formas de calcular a BRIR é através de medidas diretas num ambiente, com o uso de cabeças artificiais ou de um ouvinte, por intermédio das técnicas binaurais de gravação. Estas medições permitem que as BRIR sintetizadas sejam comparadas com estas respostas medidas e que comparações entre os seus parâmetros acústicos

sejam efetuados. Pode-se realizar, também, confrontações perceptuais dos dois resultados, medidos e preditos, por intermédio de auralização destas duas respostas impulsivas.

Porém, como o trabalho investiga a auralização inteiramente computacional, a resposta impulsiva é obtida através de um método previsional, tal como discutido acima e é calculada a resposta impulsiva binaural do ambiente. Para isso é possível simplificar o modelo, com o intuito de obter dois sinais que possuam ao menos, as diferenças interaurais (JÚNIOR, 2005).

Kleiner (1993) apresenta algumas maneiras de pós-processar a RIR para obter o efeito binaural necessário, um dos exemplos citados em seu trabalho consiste na representação estéreo através de dois canais para captar a função transferência da pressão sonora no ambiente (H1 e H2), sendo os pontos receptores (r1 e r2) alocados em distância interaural, como mostrado na Fig. 3.2. Além disso, o autor acrescenta que é possível obter a resposta binaural mais rapidamente ao usar como pontos receptores aproximações de esfera, ao invés de verdadeiros modelos de função transferência da cabeça para o ouvido.

Numa compilação de informações, Rindel e Christensen (2009) apontam os passos necessários para criar e usar a BRIR, que serviram de base para obter a BRIR neste trabalho.

- Cada canal captado (direito e esquerdo) é captado pelos dois receptores simultaneamente:
- São simuladas 6 bandas de frequência de oitava, sendo que em cada banda, o sinal sofre atenuação de acordo com o coeficiente de absorção:
- Todas as seis bandas são filtradas individualmente e posteriormente superpostas numa representação binaural.

O esquema da Fig.3.8 ilustra os passos percorridos por esse trabalho.

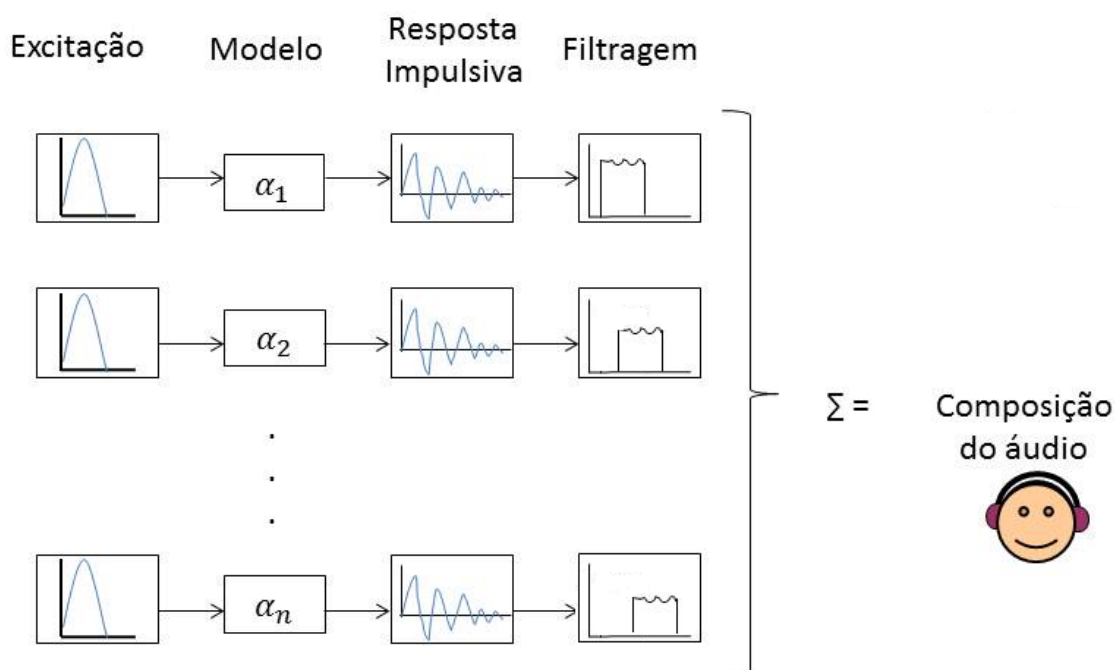


Figura 3.8: Etapas para obtenção e tratamento da BRIR.

Utilizando a metodologia de Guias Digitais de Ondas, um sinal do tipo delta de Dirac, aproximado por meio de uma meia-senóide, é simulado no modelo numérico, representando a injeção de energia no sistema, ou seja, a excitação. O próximo item, modelo, refere-se à execução do sistema variando os coeficientes de absorção (α) para cada banda de oitava. A Resposta Impulsiva diz respeito à recepção da energia sonora dos pontos receptores, carregando influência tanto do campo direto, como do reverberante da sala. O último item refere-se à filtragem do sinal no domínio do tempo por um filtro do tipo Resposta ao Impulso Infinito *IIR* (*Infinite Impulse Response*), de preferência os que possuem uma resposta plana na banda passante de interesse (FARIA, 2005).

Tal processo é imprescindível para a auralização, uma vez que a composição da BRIR devidamente filtrada representa a característica do ambiente. Ao fazer a convolução desse sinal com um sinal anecóico, será possível gerar um arquivo de áudio, capaz de reproduzir o som como se tivesse sido reproduzido dentro do recinto.

3.4.3. Técnicas de Auralização Binaural

Atualmente, existem quatro diferentes linhas usadas para auralização de salas, através de simulações binaurais, conforme apresentado na sequência, (VORLANDER, 2010):

- Auralização Inteiramente Computacional: Toda a transmissão sonora e as propriedades acústicas do local em estudo são modeladas em ambiente digital. Dessa forma, calcula-se a RIR do ambiente e obtém-se a BRIR do espaço para uma determinada posição e orientação do ouvinte. A ambiência pode ser percebida por intermédio da convolução no computador, em um programa, desta resposta impulsiva e do sinal anecóico. A apresentação deste resultado é feita utilizando sistemas binaurais, via fones de ouvido ou transaurais (reprodução via alto-falantes);
- Auralização Computacional com Múltiplos Alto-Falantes – A predição da RIR é feita da mesma forma que na auralização inteiramente computacional. Porém, a convolução é multi-canal permitindo criar uma direcionalidade mais natural do campo sonoro para o ouvinte.
- Auralização Indireta por Modelo Acústico em Escala: Essa técnica utiliza modelos acústicos em escala para medir a BRIR de um determinado ambiente. Assim, a convolução desta resposta impulsiva com o sinal de interesse pode ser feita como na auralização inteiramente computacional.
- Auralização Direta por Modelo Acústico em Escala: Este método difere do anterior pelo fato da convolução ocorrer em tempo real. O sinal desejado é ajustado para ser executado no modelo, onde é reproduzido e captado. Posteriormente é convertido novamente para a escala normal e escutado.

Atualmente, a tendência é usar a auralização inteiramente computacional em detrimento aos demais, devido à flexibilidade, em outras palavras, passível de mudanças no que se refere às características da fonte, do receptor e principalmente na geometria e nos parâmetros do ambiente (CHANDAK; ANTANI; MANOCHA, 2011).

No início dos anos 90, Kleiner (1993) já apontava a auralização inteiramente computacional como uma forte tendência dentre os métodos usados para auralização de salas. Para Júnior (2005), trata-se de uma poderosa ferramenta usada no auxílio à construção de eventos auditivos realmente convincentes, relacionados a uma fonte num determinado local.

Conforme já discutido, a cadeia de auralização de salas é formada por três componentes: geração sonora, transmissão sonora e reprodução sonora. Na auralização inteiramente computacional, esses elementos devem ser modelados para possibilitar a constituição de um ambiente acústico virtual. Isso implica que as propriedades acústicas da fonte sonora, dos materiais e superfícies, além dos próprios

ouvintes, bem como suas coordenadas dentro do recinto são inseridas no modelo numérico. Com as devidas modelagens a RIR é calculada e em seguida a BRIR para que se possa efetuar a convolução com o sinal anecóico desejado. O áudio filtrado pela Resposta Impulsiva Binaural do ambiente pode então ser ouvido. Tal sistema está representado na Fig. 3.9.

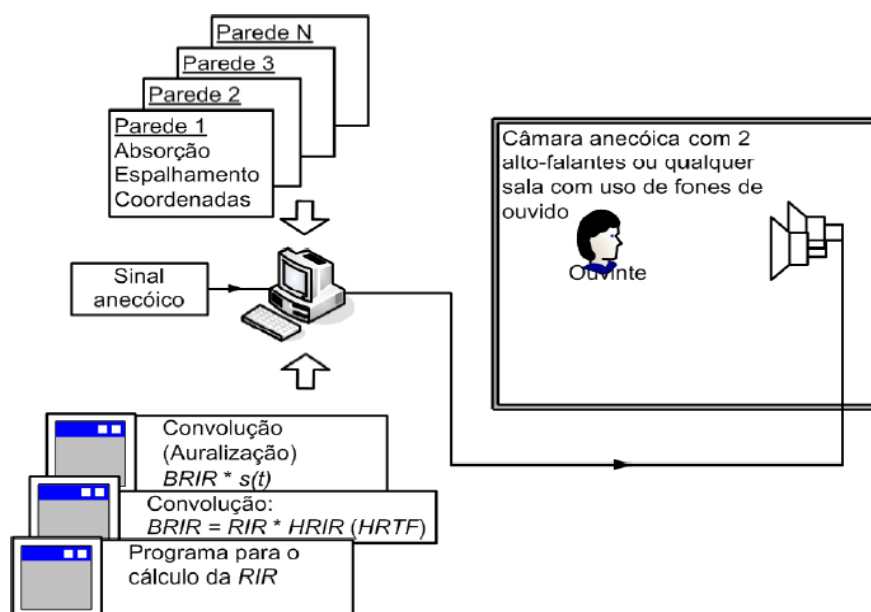


Figura 3.9: Representação auralização inteiramente computacional, figura obtida em Júnior (2005).

A descrição física das propriedades das fontes sonoras naturais é complicada, não somente devido à complexidade dessas, mas também devido à variação temporal e diferenças entre o número de transmissores em questão (KLEINER, 1993), como por exemplo a representação das diferentes propriedades acústicas dos instrumentos que compõem uma orquestra musical. Fazer essa análise no âmbito computacional é uma árdua tarefa e de acordo com (HUOPANIEME, 1999), uma abordagem bastante difundida trata-se da gravação anecóica dos sinais desejados, como o som gerado pela orquestra para ser convoluído posteriormente com a RIR, gerada por uma fonte pontual dentro do ambiente, estratégia que será adotada por este trabalho.

A modelagem do meio de transmissão sonora, bem como dos receptores são baseadas no conceito de resposta impulsiva. A forma de apresentação das pressões sonoras para o ouvinte, resultantes da simulação binaural, pressupõem fones de ouvido ou um sistema estéreo com processamento de sinais adequado. No Anexo 1

foi feito um detalhamento sobre os fundamentos de análises de sinais abordado ao longo do trabalho.

Os filtros digitais emergem como uma ferramenta que contribui no processamento dos sinais de áudio. Na auralização e reprodução sonora, eles servem como a base para filtrar, convoluir e para fazer os ajustes dos efeitos do áudio final, incluindo, pistas especiais, como atributos espaciais ou na equalização em equipamentos de reprodução sonora.

Os filtros digitais são projetados de combinações de componentes de adição, multiplicação e atrasos. Em função da excitação do tipo impulso, os filtros digitais podem ser dividido em dois grupos: filtro com resposta ao impulso com duração finita (*Finite Impulse Response - FIR*) e filtros com resposta ao impulso de duração infinita - (*Infinite Impulse Response - IIR*).

Os filtros do tipo FIR são mais estáveis, uma vez que a saída depende apenas da entrada dos dados e não do *feedback*, ou seja, independente das amostras passadas. Por sua vez, os filtros do tipo IIR fazem aproximação das funções de resposta ao impulso desejado, sendo que o sinal de saída é criado pela amplificação e adição de amostras passadas. Devido ao efeito do laço do *feedback*, o filtro de resposta impulsiva pode ser definido infinitamente longo (*Infinite Impulse Response*).

Quando comparados, os filtros IIR requerem menor esforço e complexidade do que o filtro FIR, porém devido às condições de alimentação, eles podem ser instáveis, diferentes dos filtros FIR. Não há uma preferência absoluta para uma ou outra aproximação.

De acordo com Raghuvanshi et. al. (2010) e Mooney (2011) é possível usar o filtro IIR para auralização de salas, tal como será abordado por esse trabalho. Dentre os filtros mais difundidos dessa categoria é possível citar os filtros de Bessel, *Butterworth*, *Chebyshev* e elíptico.

Para esse trabalho, o filtro do tipo *Butterworth* foi adotado em função da linearidade, em outras palavras, por apresentar uma resposta em frequência o mais plana quanto for possível na banda passante. Isso implica que não apresenta *ripple* ou ondulações na banda passante e se aproxima de zero na banda rejeitada. Trabalhos como os de Júnior (2005), Boren (2011) e Figueiredo (2005) sobre acústica de salas trabalham com esse tipo de filtro.

Quanto ao filtro ótimo depende da aplicação e implementação do software, (Vorlander, 2008). Para maiores informações, consultar: Papoulis, (1981) e Kinsey, Alan e James, (1999).

CAPÍTULO IV

Malhas de Guias Digitais de Ondas

Este capítulo faz uma abordagem a respeito da técnica de Guias Digitais de Ondas, cuja formulação foi proposta por Julius O. Smith, pesquisador do CCRMA – *Center for Computer Reserch in Music and Acoustics* da Universidade de Stanford, no início dos anos 90. Nesse sentido, é feito um levantamento referente à contribuição de diversos trabalhos desenvolvidos e que são relacionados ao assunto. Posteriormente, far-se-á a descrição do princípio matemático da técnica de Guias Digitais de Ondas, focando principalmente, nas diferentes formas de arranjar as guias, com o intuito de gerar diferentes geometrias de malha, tanto para análise bidimensional, como tridimensional. E por fim, uma discussão acerca de suas vantagens e limitações, como o erro de dispersão, encerra este capítulo.

4.1 – Introdução

Desenvolvida originalmente para aplicações musicais, conforme vastamente explicado em Smith (1992) e graças à característica do regime unidimensional das guias, trata-se de uma técnica perfeitamente aplicável à simulação de instrumentos musicais, como os de corda (CAMPOS, 2006), (MIGNOT; HELIE; MATIGNON, 2010).

Porém, devido a sua eficiência, a técnica pôde ser empregada em sistemas maiores e mais complexos, como ambientes de propagação acústica, (CAMPOS, 2003), (ERKUT; MATTI, 2002).

A metodologia da guia é baseada na aproximação numérica da solução unidimensional da equação da onda e excelentes resultados têm sido encontrados em relação à precisão sonora e em termos da eficiência computacional, (sendo possível estender às simulações de tempo real), (ROMEIRO, 2011). Southern, Murphy e Wells (2009) ainda acrescentam que por se tratar de um modelo baseado na propagação da onda, oferecem a vantagem de maior estabilidade nas aproximações geométricas, grande precisão nas baixas frequências e conseguem simular com mais exatidão efeitos da propagação sonora, como a difração.

Conforme já mencionado, a Guia de Onda Digital (*Digital Waveguide* – DW) pode ser interconectada para formar malhas, ou seja, Malhas de Guias Digitais de Ondas (*Digital Waveguide Mesh* – DWG). Com a abordagem tridimensional é possível simular a propagação sonora em meios de forma arbitrária e é justamente nesse contexto de análise 3D, que a modelagem de salas acústicas naturalmente emerge como uma área de pesquisa bastante promissora, (SAVIOJA ET AL, 1995)

Os modelos de Guias Digitais de Ondas são modelos numéricos no domínio do tempo, e isso provê simplicidade nas soluções computacionais de propagação da onda. Matematicamente, podem ser classificadas como um caso particular da técnica numérica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain* – FDTD), porque ao analisar a propagação sonora através das malhas quadradas (bidimensional) e cúbica (tridimensional), apresentadas nas sessões 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente, a essência de ambas as metodologias é muito semelhante, embora tenham se mostrado mais eficientes em situações discutidas em Berdahl, Niemeyer e Smith III (2009).

De acordo com Smith (1992), na abordagem da DWG, o custo computacional é menor, uma vez que trata o problema por meio de atrasos temporais de propagação, por meio de guias unidimensionais, sendo a pressão sonora computada em pontos estrategicamente posicionados e que são conhecidos como juntas de dispersão. Além disso, trabalhos de Southern, Siltanen e Lauri (2011), Faria (2005), Erkut e Matti (2002) e Hacıhabiboglu, Gunel e Cvetkivic (2010) fazem comparação do tempo e qualidade dos resultados obtidos com relação a outras técnicas numéricas e chegam a conclusões muito semelhantes no que tange à robustez e precisão dos dados calculados pela metodologia.

Outro ponto de extrema relevância no que diz respeito à vantagem em optar pela DWG, consiste na capacidade em simular geometrias diferenciadas, incluindo a própria difração, que é negligenciada nas análises feitas pelos modelos baseados na

geometria. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos objetivando essa contribuição, sendo possível citar os trabalhos de Murphy (2008), Campos (2003) e Smith (1992), Siltanen, Lokki e Savioja (2010) investigam o efeito que a simulação da difração causa na reverberação do ambiente, afetando diretamente na qualidade dos resultados obtidos.

Para finalizar, é notória a vasta aplicabilidade da DWM nas mais diferenciadas situações, não restringindo exclusivamente a acústica de salas. No trabalho de Hacıhabiboglu, Gunel e Cvetkovic (2010) por exemplo, é proposto um método para a simulação da direcionalidade dos microfones usando DWG, onde são apresentados e discutidos os detalhes da geração e captação da intensidade sonora dos sinais provenientes dos microfones virtuais. Por sua vez, Freenston (2009) faz uso da técnica de guias digitais de ondas e os mapas de impedância, em 2-D, que são capazes de mapear o sistema fonador, como resultado, obteve sinais sonoros mais realistas. Já em Sinclair, Scavone e Wanderley (2009), é feita uma investigação entre a interação do som produzido pelos instrumentos de áudio. Com o auxílio da técnica obtiveram conclusões significativas a respeito da influência que a modelagem coerente dessa interação exerce na reprodução do áudio e na qualidade final da reprodução sonora. Por fim, Evangelista e Eckeholm (2010) fazem uma análise da influência do atrito produzido pelo músico em instrumentos de corda, como guitarra por exemplo. Assim, eles propõem uma nova estrutura para avaliar a influência do atrito entre os dedos e as cordas do instrumento.

Em busca de melhor desempenho, trabalhos como Romeiro (2011) focam na melhora do processamento, investindo na paralelização em larga escala de Malhas de Guias Digitais de Ondas tridimensionais, através de sistemas nomeado como o MESHOTRON, desenvolvido na Universidade de Aveiro e que é baseado na paralelização do código.

4.2 – Guias Digitais de Ondas

Os itens a seguir fazem um levantamento a cerca dos fundamentos e elementos necessários à formulação das guias digitais de ondas.

4.2.1 – Solução Discreta da Equação da Onda Usando Guias Digitais de Ondas

As Guias Digitais de Ondas caracterizam o meio de propagação e como o próprio nome sugere, são dispositivos que guiam o movimento da onda, que é descrito pela Eq. (2.1). Elas partem da solução unidimensional expressa pela Eq. (4.1) e são usadas para simular a propagação sonora, tal com ilustra a Figura 4.1:

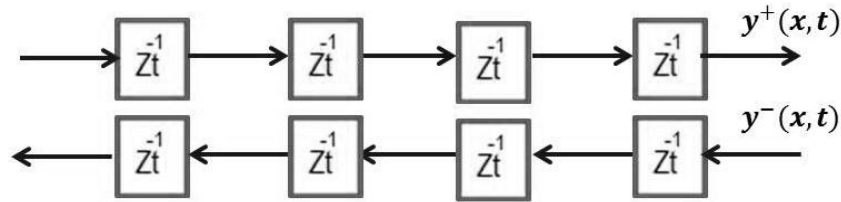


Figura 4.1 – Representação de uma Guia Digital de Onda.

A letra Z_t simboliza uma função transferência, referente ao transporte das propriedades da onda de uma extremidade a outra da guia. A potência (-1) simboliza o atraso temporal necessário para que as informações trafeguem de uma extremidade a outra e as setas indicam o duplo sentido do movimento. A soma das duas componentes representa a solução geral do problema na posição x e no tempo t , tal como propõem a solução de d'Alembert, Eq.(4.1):

$$u(x,t) = h(x - ct) + g(x + ct) \quad (4.1)$$

Dessa forma, a essência de sua modelagem numérica consiste no somatório entre duas parcelas, que correspondem às ondas que se movimentam na mesma direção, porém em sentidos contrários e é simulado usando um atraso temporal bidirecional. De acordo com o que é representado na Eq.(4.1) as parcelas são representadas pelas funções arbitrárias h e g , que relacionam as variáveis de deslocamento (x), tempo (t) e velocidade de propagação da onda no meio (c).

A solução de D'Alembert pode ser implementada no domínio digital. As discretizações do tempo e espaço são relacionadas com a simulação das Guias Digitais de Ondas como mostrado na Eq.(4.2):

$$\begin{aligned} t &\rightarrow t_n = nT, (n \in \mathbb{Z}) \\ x &\rightarrow x_m = mX, (m \in \mathbb{Z}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Sabendo que $X = cT$, é possível reescrever a Eq.(4.1), como a Eq.(4.3):

$$u(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + g\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (4.3)$$

Substituindo as variáveis discretas x_m e t_m na equação acima, obtém-se a Eq.(4.4):

$$\begin{aligned} u(x_m, t_n) &= f\left(nT - m\frac{x}{c}\right) + g\left(nT + m\frac{x}{c}\right) = f[(n-m)T] + g[(n+m)T] \\ &= u^+[(n-m)T] + u^-[(n+m)T] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Uma vez que T multiplica todos os argumentos, é possível suprimi-lo de forma a obter a Eq.(4.5):

$$\begin{aligned} u^+[(n-m)T] &= u^+(nT) = u^+(n) \\ u^-[(n-m)T] &= u^-(nT) = u^-(n) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Assim sendo, a solução digital da Equação Unidimensional da Onda pode ser escrita na seguinte forma, expressa pela Eq.(4.6):

$$u(n) = u^+(n) + u^-(n) \quad (4.6)$$

Da Equação (4.4) pode-se concluir que as componentes viajantes da onda podem ser modeladas como atrasos temporais digitais, que são representadas pela Fig. 4.2. Os elementos dispostos na linha superior, $p^+(n-m)$, sendo $(m=1, 2, 3, \dots)$ podem ser interpretados como um sinal que saiu do nó vizinho, no m -ésimo instante anterior, e está alcançando o nó, com um sinal $p^+(n)$. Similarmente, os termos $p^-(n+m)$ representam o sinal que está alcançando o nó, num m -ésimo instante posterior ao ter saído do nó vizinho com um sinal $p^-(n+3)$, que é encontrado na linha inferior da Fig. 4.2, (BOAVENTURA, 2009). Essa estrutura é conhecida como Guias Digitais de Ondas (Digital Waveguide – DW), (SMITH, 1992).

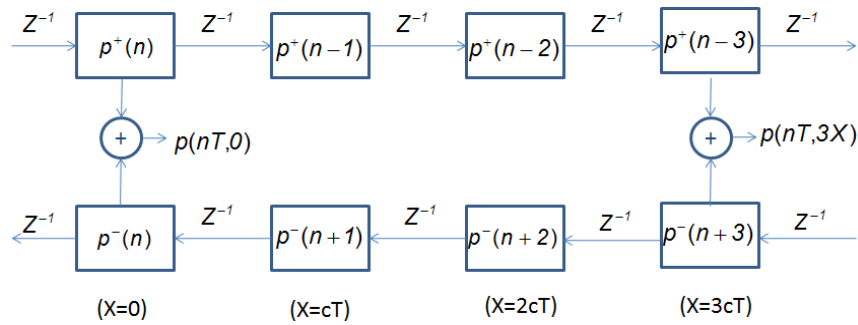


Figura 4. 2 – Digital Waveguide. Figura modificada de Van Duyne e SmithIII (1993).

Como é possível observar, as linhas superiores e inferiores representam as componentes da pressão sonora das ondas viajantes pelo eixo das coordenadas, no sentido positivo e negativo, respectivamente. Os nós, representados pelos círculos assinalados positivamente e situados entre as linhas, correspondem a pontos discretos. Os atrasos temporais são representados pela função transferência Z^{-1} , que indicam um passo de tempo e cada passo temporal ocorre num intervalo espacial de $X=cT$. A soma das componentes $p^+(n)$ e $p^-(n)$, resulta na amplitude da pressão sonora num determinado ponto do espaço.

Ainda no escopo da solução das Guias Digitais de Ondas, é necessário amostrar o sinal em intervalos, em outras palavras, períodos de T segundos, correspondente a uma taxa de amostragem, (f_s , frequência de atualização da malha) e representado pela Eq. (4.7), (MOURA, 2005).

$$T = 1 / f_s \quad (4.7)$$

Dessa forma, a variável X corresponde à distância percorrida pela onda num intervalo de tempo T , deve ser estimada como na Eq.(4.8):

$$X = cT \quad (4.8)$$

Onde:

c : a velocidade de propagação do meio, para o ar a uma temperatura de 20°C , $c=342\text{m/s}$ (Gerges, 2000).

De acordo com o Teorema de Amostragem de Nyquist-Shannon é possível reconstruir um sinal analógico a partir de uma amostra digital, se a frequência do sinal

digital não exceder a metade da frequência de amostragem. Dessa forma, seja f_L a maior frequência do sinal composto pelo somatório das duas componentes $p^+(t)$ e $p^-(t)$ a relação entre a maior frequência do sinal (f_L) e a frequência de amostragem (f_s) num dado ponto expresso pela Eq. (4.9):

$$2f_L \leq f_s \quad (4.9)$$

4.2.2 – Juntas de Dispersão

A Equação da Onda, Eq. (2.1) que descreve a propagação sonora multidimensional, pode ser solucionada em termos das componentes das ondas viajantes. Uma das possíveis soluções para ela, envolve uma integral de soma de um número infinito de ondas planas viajando em todas as direções (θ : representa o ângulo entre a direção de propagação e o eixo x), expresso pela Eq. (4.10), Campos (2006):

$$p(t, x, y) = \int_0^{2\pi} p\theta [x \cos \theta + y \sin \theta + ct] d\theta \quad (4.10)$$

Mas devido à dificuldade dessa solução, uma aproximação alternativa é baseada na solução unidimensional da onda, que pode ser interpretado como linhas de atrasos bidimensionais. Fazendo a interconexão das guias de ondas é possível formar uma Malha de Guias Digitais de Ondas Multidimensional - *Digital Waveguide Mesh (DWM)*, Van Duyne e Smith III, (1993).

Os pontos em que as guias se conectam, e as pressões sonoras são captadas, são conhecidos como Juntas de Dispersão e elas são conectadas por guias de ondas bidirecionais. De forma geral, cada interconexão entre as guias de ondas i , possui sua própria característica de impedância R_i , (CAMPOS, 2003). A Fig. 4.13 mostra o caso geral de uma junta de dispersão com N vizinhos, $i=1,2,\dots,N$.

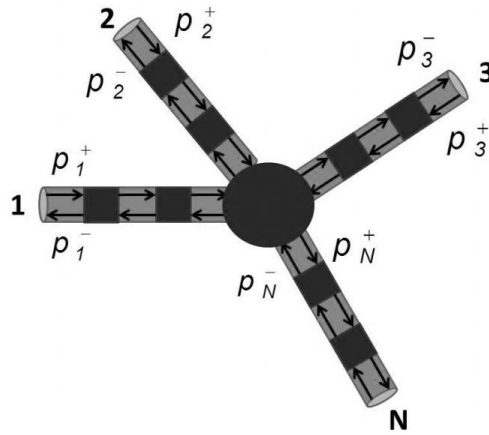


Figura 4.3 – Junta de dispersão genérica com N guias digitais de ondas interconectadas, sendo $i=1, 2, \dots, N$. Os sinais '+' e '-' correspondem as componentes de ondas viajantes para dentro e para fora da junção, representada pelo círculo central. Figura modificada de Campos, (2003)

Os termos p_i^+ e p_i^- apresentados na Fig. 4.3 estão relacionados com as pressões de entrada e saída na guia. Por exemplo, o sinal p_i^+ representa o sinal que está chegando à junção i e que partiu do lado oposto da guia. Similarmente, o sinal p_i^- representa o sinal que está saindo de i e chegará ao lado oposto da guia. Dessa maneira, as seguintes relações são aplicáveis, Eq.(4.11), Eq.(4.12) e Eq.(4.13):

$$p_i = p_i^+ + p_i^- \quad (4.11)$$

$$v_i = v_i^+ + v_i^- \quad (4.12)$$

$$p_i^+ = Rv_i^+ \quad (4.13)$$

$$p_i^- = Rv_i^-$$

As Equações (4.11) e (4.12) expressam que a pressão ou velocidades num determinado ponto são determinados pela soma de suas pressões ou velocidade de entrada e saída, respectivamente. As duas grandezas físicas podem ser relacionadas pela impedância do meio, como representado pela Eq.(4.13). A propagação sonora na junta de dispersão com N Guias Digitais de Ondas conectadas ocorre segundo o Princípio de Conservação de Massa e Energia:

1. A soma das velocidades de entrada v^+ deve ser igual à soma das velocidades de saída v^- , Eq.(4.14):

$$\sum_{i=1}^N v_i^+ = \sum_{i=1}^N v_i^- \quad (4.14)$$

2. A pressão sonora da vizinhança deve ser igual à encontrada na junta de dispersão, Eq.(4.15).

$$p_i = p_J, \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (4.15)$$

Combinando as Eq.(4.11) e (4.15), é possível escrever a Eq.(4.16):

$$p_i^- = p_J - p_i^+, \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (4.16)$$

Substituindo a relação (4.11) em (4.14) e usando (4.16), obtém-se uma expressão para a pressão sonora no ponto p_j em função da pressão sonora da parcela de ondas viajante, p_i^+ , Eq. (4.17), (MURPHY; MULLEN, 2002):

$$p_j = \frac{2 \sum_{i=1}^N \frac{p_i^+}{R_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}} \quad (4.17)$$

Como o meio adotado é homogêneo, logo todas as impedâncias de Guias Digitais de Ondas são iguais, dessa forma, a Eq. (4.17) pode ser simplificada para a Eq. (4.18), que representa a pressão sonora numa junta de dispersão, Campos (2003).

$$p_j = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N p_i^+ \quad (4.18)$$

Ao fazer um arranjo com N Guias Digitais de Ondas conectadas com várias juntas de dispersão, o resultado obtido será parecido com a Fig. 4.4. Nessa representação as guias assumem um comprimento unitário, salientando que elas sempre são referidas na literatura como unidades de atraso bidirecionais, mas agora elas terão na extremidade oposta de cada guia um novo nó é alocado (CAMPOS, 2003).

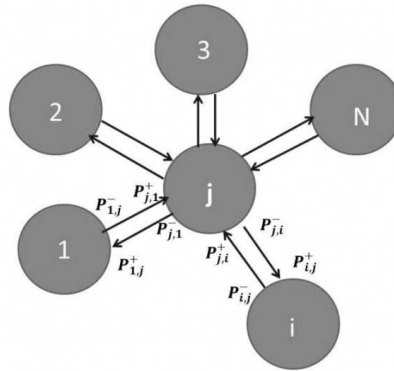


Figura 4.4 – Junta de dispersão conectada a N vizinhos por unidades de atraso bi-direcionais. Figura modificada de Savioja et al,(1995).

Considerando que não há perda nas juntas de dispersão, os valores de entrada na junta j , num instante n , são os mesmos valores de saída das juntas vizinhas, no caso, i , num passo de tempo anterior, $n-1$, como expresso na Eq. (4.19):

$$p_{ji}^{+}(n) = p_{ij}^{-}(n-1) \quad (4.19)$$

É possível reescrever a Eq.(4.19) em notação da função transferência- z (CAMPOS, 2003), para expressar a evolução temporal, Eq. (4.20).

$$p_{ji}^{+} = z^{-1} p_{ij}^{-} \quad (4.20)$$

4.3 – Malhas de Guias Digitais de Ondas

Usando as juntas de dispersão é possível criar malhas de Guias Digitais de Ondas. De acordo com Fontana e Rocchesso (1995), as juntas na malha consistem numa grade de amostragem, isto é, o arranjo regular dos nós converge num domínio N dimensional, onde cada nó cobre um dado domínio N-dimensional. Cada nó sendo conectado aos nós vizinhos próximo por unidades de atraso bidimensionais de tamanho d.

A forma de arranjar os nós e a simulação da propagação usando as unidades de atrasos temporais é definida como topologia da malha. Em virtude das Eq.(4.16) e Eq.(4.17), que formulam matematicamente as juntas de dispersão e da Eq.(4.20) que simula o atraso unitário temporal, a operação da malha de Guias Digitais de Ondas é governada segundo fluxograma da Fig. 4.5, Van Duyne e SmithIII (1993).



Figura 4.5 – Fluxograma do algoritmo básico da simulação da Malha de Guia Digital de Onda. Figura modificada de Van Duyne e Smith III (1993).

No bloco *Cálculo da Junta* a componente de saída do nó i é obtida pela contribuição das ondas viajantes dos nós vizinhos menos a componente de entrada do nó i , que estão defasados no tempo. Com a impedância sendo configurada para ter o mesmo valor (uma aproximação usual, quando se trata de um meio homogêneo) para os atrasos temporais unitários, o cálculo na junta de dispersão são dados pela manipulação algébrica entre as Eq. (4.16) e Eq. (4.18), que resulta na Eq.(4.21):

$$p_i^- = \left(\frac{2}{N} \sum_{j=1}^N p_j^+ \right) - p_i^+ \quad (4.21)$$

Onde N é o número de vizinhos de cada nó. Nesse ponto, cabe ressaltar que o valor de N não está relacionado com a dimensionalidade da malha, ou seja N não é necessariamente 2 para o caso 2D, nem 3 para o caso 3D.

Em *Atualização Temporal*, cada uma das componentes viajantes de saída que é calculada no passo de tempo precedente é transportado para o nó de destino, em outras palavras, faz uma atualização das pressões sonoras nas juntas de dispersão. O período da amostra T é segmentado em vários passos temporais, que são destinados a simular a função transferência das unidades de atraso temporal, como representado pela Eq.(4.20).

Para garantir estabilidade e convergência do método, na modelagem das topologias, uma importante característica é a velocidade nominal de propagação do som, que é definida como $c_n=1/\sqrt{N}$, assim a velocidade de propagação é calculada como a velocidade nominal de propagação multiplicado por unidades espaciais e dividida pelo período, onde N representa o número de dimensões espaciais, relacionado com o número de nós vizinhos da junta Savioja et al. (1996). As unidades de espaço são interpretadas como distância inter-nodal (d) e a velocidade de propagação no meio é expressa pela Eq.(4.22):

$$c = \frac{d}{T\sqrt{N}} \quad (4.22)$$

Ainda no escopo de posicionamento de nós no modelo, um importante parâmetro para a simulação da propagação sonora através das malhas de guias digitais de ondas aponta-se como imprescindível. Trata-se da Frequência de Atualização da Malha (fs), que é calculada através da Eq.(4.23):

$$fs = \frac{c\sqrt{N}}{dx} \quad (4.23)$$

Onde c representa a velocidade de propagação do meio, N é o número de nós vizinhos de uma malha e dx trata-se da distância internodal. Conforme será discutido

na sessão 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente, para o caso SWG, $N=2$, enquanto que TWG, $N=3$ e dx é a amostra espacial. Uma vez que a Equação Geral da Onda é de carácter hiperbólico, há uma relação de estabilidade imposta pelo sistema, fixando a distância entre nós dx (SMITH, 1992):

4.3.1 – Tratamento da Condição de Contorno na Malha de Guia Digital de Ondas

A modelagem do comportamento físico de sistemas governados por equações diferenciais parciais requerer um método genérico para solucioná-los, sendo ele analítico ou numérico, e também condições de contorno apropriadas, descrevendo o que acontece na região que delimita o sistema físico em consideração (JAMES ET.AL, 1999). Por esse motivo, uma atenção especial deve ser dada para essa região da análise.

Para implementar de maneira adequada as condições de contorno, o domínio deve ser delimitado por um conjunto especial de nós, levando em consideração a quantidade reduzida de nós vizinhos, uma vez que o nó se encontra numa região de fronteira.

Na modelagem da malha de guias digitais de ondas, assim como mostrado na Fig. 4.6, esses pontos são tratados como os nós de contorno e as suas posições definem os limites do domínio modelado, que geralmente, coincide com a transição entre os diferentes meios de propagação. Porém, devido à discretização espacial dos nós, podem ocorrer erros, porque o contorno físico real não coincide exatamente com os nós de contorno da modelagem. Por essa razão, essas superfícies costumam ser representadas por aproximações. Intuitivamente, com o aumento da densidade da malha o problema pode ser reduzido, porém, não eliminado (CAMPOS, 2003).

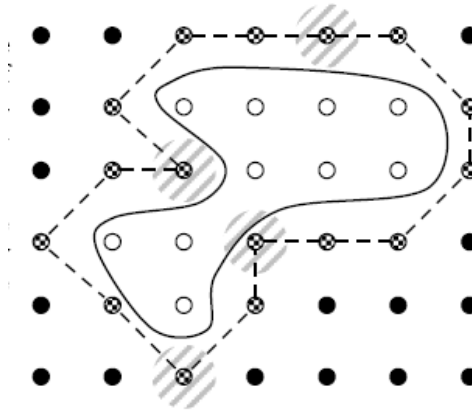


Figura 4.6 – Representação do erro causado pela discretização na modelagem da condição de contorno. Os limites reais do domínio modelado e a aproximação correspondente são representados respectivamente, pelas linhas contínuas e pelas linhas pontilhadas. Pontos brancos: nós que representam o meio de propagação, no caso, o ar. Pontos riscados: nós do contorno. Pontos pretos: nós inativos.

Do ponto de vista físico, a região de fronteira é caracterizada pela descontinuidade de impedância, assim como apresentado na Fig. 4.7.

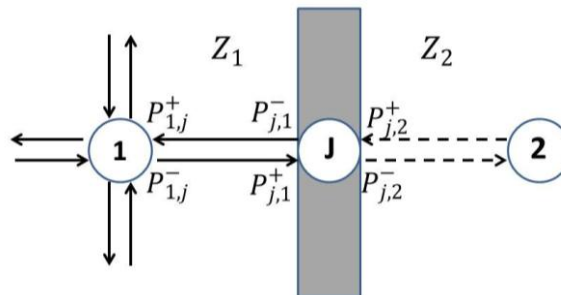


Figura 4.7 – Representação da junta de dispersão representando uma descontinuidade na impedância.

Na Figura 4.7, os meios 1 e 2 correspondem aos lados: esquerdo e direito, respectivamente. A junta J que representa a descontinuidade da impedância foi posicionada na mesma posição do obstáculo e o modelo da condição de contorno é baseado na Eq. (4.24), relacionado a reflexão e a pressão sonora p_1^- :

$$p_1^+ = rp_1^- \quad (4.24)$$

Ainda analisando a Fig. 4.7, é possível constatar que na região de contorno o nó sofre influência dos nós vizinhos, cujos valores de impedância são diferenciados. Nesse caso, o índice de reflexão é definido pela Eq.(4.25):

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.25)$$

Porém, seguindo o trabalho de Campos (2002), os valores de reflexão inseridos nos códigos são oriundos da relação $1-\alpha$, sendo α os coeficientes de absorção tabelados dos materiais.

4.3.2 – Perda de Energia para o Meio

As discussões e formulações apresentadas até então se baseiam na propagação sonora negligenciando as perdas. Porém, num sistema físico real, há perdas de energia causadas pelo atrito entre a onda sonora o ar, por exemplo.

De acordo com Campos (2005), uma aproximação mais simples consiste em adicionar um termo de perda para a equação da onda em regime unidimensional, como resultado, os dois componentes de onda viajantes da solução de d'Alembert, Eq.(4.1) será reescrito como a Eq.(4.26):

$$p(t_n, x_m) = g^{+m} p^+(n-m) + g^{-m} p^-(n+m) \quad (4.26)$$

Onde g é um fator escalar positivo menor do que 1, indicando a perda do sistema.

A Figura 4.8, ilustra como esse fator de perda é inserido na guia digital:

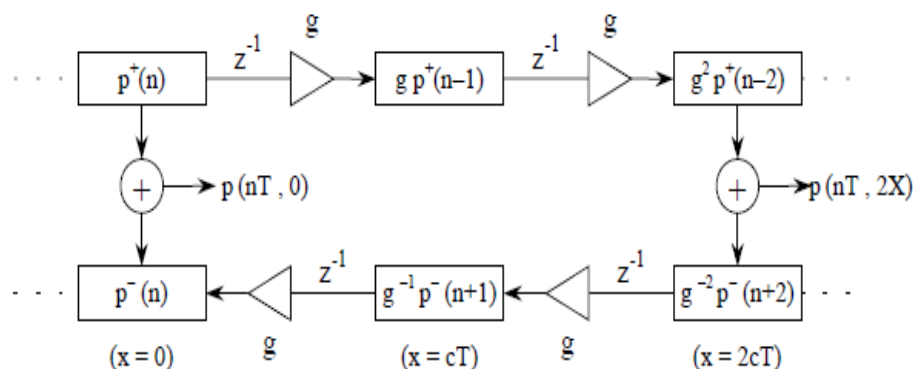


Figura 4.8 – Perda na guia de onda Digital. Adaptação de Smith (1992).

No contexto de modelagem de salas acústicas, a absorção das paredes é a principal causa de dissipação de energia, e uma perda insignificante de absorção do ar, sendo que esta aumenta proporcionalmente com a frequência (MOORER, 1979). A absorção do som pelo meio de transmissão depende de uma série de fatores, tais como a distância, temperatura, umidade, entre outros, sendo que na prática o fator que mais interfere é a variação de temperatura. (SAVIOJA, 2000).

Savioja (2000) ainda faz uma análise com relação à absorção sonora em função da frequência do sinal e do volume do ambiente. A Fig. 4.9 mostra a atenuação sonora em relação à frequência e a distância, nela foram plotados seis pontos receptores, sendo que as suas respectivas distâncias até a fonte estão assinaladas no gráfico.

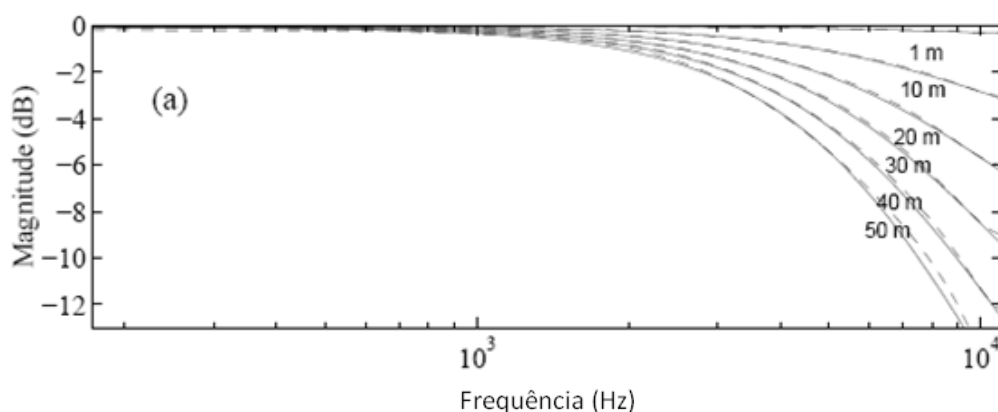


Figura 4.9 – Absorção sonora do ar com relação da distância e a frequência. Figura obtida em Savioja (2000).

Note que a atenuação ocorre em função da distância que a onda deve percorrer dentro do recinto e da frequência do sinal. Como os resultados comprovam, só faz sentido incorporar a absorção do ar em ambientes relativamente grandes e quando se trabalha com frequências muito altas, que não condizem com o objetivo desse trabalho. Por essa razão, em todas as simulações feitas o efeito de absorção do meio será negligenciado.

4.3.3 – Modelagem da Fonte e Propagação.

Na modelagem de fontes sonoras usando guias digitais de ondas, uma excitação é gerada na malha para reproduzir a injeção de energia sonora (SMITH, 1992). Na modelagem das salas acústicas deste trabalho, uma fonte sonora é simulada por injeção de um sinal, geralmente senoidal, em um único nó, implementando assim, uma fonte pontual, conforme é possível observar na Fig. 4.10.



Figura 4.10 – Representação da fonte sonora na Malha triangular e bidimensional de Guias Digitais de Ondas.

Da Figura 4.10, note que a excitação ocorre em apenas um ponto e que o sinal proveniente desse distúrbio, se propaga através dos pontos vizinhos da malha e interage com os obstáculos do recinto, até alcançar os pontos receptores. Ainda no escopo do sinal da fonte e, para garantir uma proximidade dos sistemas físicos reais, a fonte é simulada com sinais senoidais em diferentes bandas de frequências, assim como mostram a Fig. 4.11 (A) e Fig. 4.11(B), respectivamente:

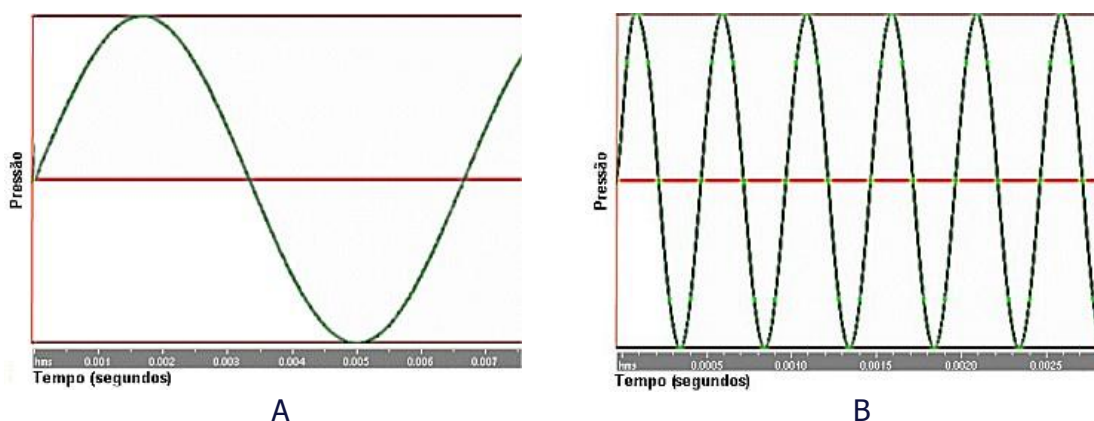


Figura 4.11 – Sinal senoidal no tempo típico aplicado na fonte sonora. A Fig. 4.11 A representa um sinal de baixa frequência, responsável por emitir os sons graves e na Fig. 4.11 B representa um sinal de alta frequência, responsável por produzir os sons agudos.

O mecanismo de propagação e captação do sinal através das juntas de dispersão pode ser resumido em três etapas: a excitação através de um pulso num nó arbitrário, a propagação através das guias e o cálculo da pressão nas juntas de dispersão.

A cada iteração (passo de tempo), os pulsos viajam através da guia virtual (representada na Fig. 4.12 pelas setas em sentidos contrários) de uma junta de dispersão (representada pelos círculos) até as outras vizinhas, cuja posição será definida em função da malha adotada, sendo que nesse caso trata-se de um arranjo SWG. Quando um pulso atinge uma junta de dispersão, ocorre um balanço de energia, em outras palavras, uma parcela da energia incidente dos nós vizinho $p^+(n)$ alcança uma determinada junta de dispersão, enquanto outra parcela simultaneamente sai da mesma junta de dispersão $p^-(n)$ e é refletida aos nós que deram origem à energia incidente.

A Figura 4.12 mostra esse processo sequencial de propagação da onda numa malha SWG, que será apresentada em detalhes na Sessão 4.4.1. Observe que no instante inicial (t_0) num único nó é inserida a energia sonora, simulando uma fonte pontual. À medida que os passos discretos de tempo decorrem, a energia vai sendo dissipada entre os nós da malha, que estão representados pelos círculos em vermelho.

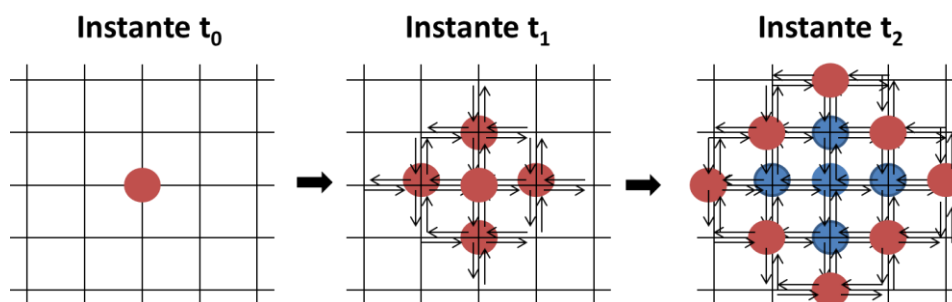


Figura 4.12 – Evolução temporal da propagação sonora numa malha SWG de guias digitais de ondas.

Este mecanismo de propagação da energia na malha repete-se durante todo o intervalo de tempo definido para a simulação.

4.4 Malha 2-Dimensional de Guias Digitais de Ondas

Uma malha de Guias Digitais de Ondas é definida como uma extensão da técnica unidimensional de Guia Digital de Onda, Van Duyne e Smith III (1995) , Savioja et al (1995) acrescenta que uma malha de guias digitais é uma matriz de pontos discretamente espaçados por guias digitais de ondas unidimensionais. Essas guias são arranjadas ao longo de dimensões perpendiculares e tais pontos, juntas de dispersão, são posicionados nessa região de interconexão.

Através da formulação matemática das juntas de dispersão e a função transferência é possível criar uma malha através de juntas de dispersão e a das guias digitais de ondas, que implementam digitalmente o atraso bidirecional, simulando a passagem de informação de um nó ao outro.

4.4.1 – Malha Quadrada – Squared Waveguide (SWG)

O caminho mais simples para formar malhas bidimensionais está na superposição de duas guias regularmente espaçadas e formando ângulo reto entre elas Van Duyne e Smith III (1996), tal representação está ilustrada na Fig. 4.13.

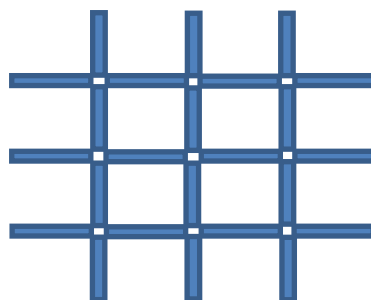


Figura 4.13 – Representação genérica de Guias Digitais de Ondas para formarem uma malha quadrada.

Nesse tipo de formulação, cada nó é conectado por 4 juntas de dispersão vizinhas via dois atrasos temporais bidirecionais ao longo do eixo x e eixo y , resultando numa topologia 2D (CAMPOS, 2006). Em outras palavras, cada junta é conectada por quatro pontos adjacentes, por meio de quatro guias digitais de ondas, conforme a Fig. 4.14:

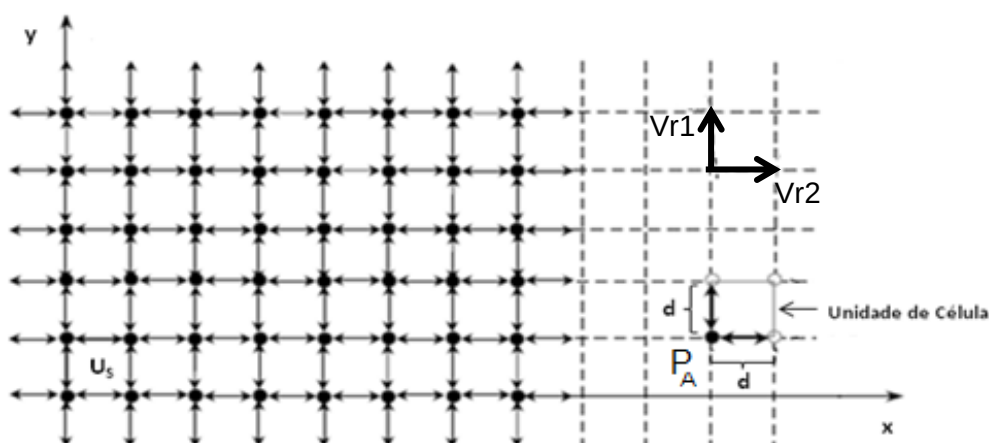


Figura 4.14 – Representação genérica de uma Malha Quadrada - SWG. Figura modificada de Campos (2003).

Na Figura 4.14, os nós são representados pelos pontos e as guias são representadas pelo duplo sentido da seta. No lado direito da figura é possível ver um quadrado, que representa uma unidade de célula dessa topologia. A variável d equivale à distância internodal, sendo o ponto P_A um dos vértices do quadrado, e em negrito estão duas unidades de atraso temporal ao longo dos eixos x e y , representando a propagação em x e y .

Pensando na malha como sendo um meio composto por molas flexíveis interligadas entre si, sem qualquer perda de energia, duas condições são requeridas:

1. As velocidades de todas as molas, nas juntas de dispersão, devem possuir um mesmo valor em toda a vizinhança, Eq. (4.27):

$$v_1 = v_2 = \dots = v_{2N} \quad (4.27)$$

2. O somatório de todas as forças exercidas pelas molas, na junta de dispersão, deve ser nulo, Eq. (4.28):

$$F_1 + F_2 + \dots + F_{2N} = 0 \quad (4.28)$$

Para um sistema acústico, a pressão acústica na junta de dispersão deve ser igual à pressão encontrada na vizinhança e a soma das velocidades volumétricas de entrada nas juntas de dispersão v_i^+ deve ser igual à soma das velocidades volumétricas de saída v_i^- , Eq. (4.29), (SAVIOJA, 1999):

$$\sum_{i=1}^{2N} v_i^+ = \sum_{i=1}^{2N} v_i^- \quad (4.29)$$

Relacionando as Equações (4.27), (4.28) e (4.29), somada a solução digital da equação da onda, obtém a Eq. (4.30). (VAN DUYNE; SMITHIII, 1993).

$$v_J(n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2N} v_i^+(n) \quad (4.30)$$

Como os sistemas de molas flexíveis e acústico foram definidos como sendo análogos, é possível estender essa solução para encontrar o valor da pressão acústica, tal como apresentado na Equação (4.31):

$$p_J(n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2N} p_i^+(n) \quad (4.31)$$

Uma configuração das Juntas de Dispersão para o caso SWG é representada como a Fig. 4.15:

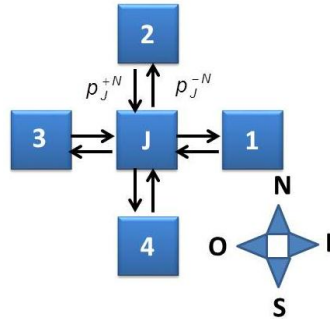


Figura 4.15 – Representação esquemática das Juntas de Dispersão na malha SWG. As porções P+J e P-J representam respectivamente as porções de entrada e saída na junta J, em direção a junta 2 (posicionada ao Norte). Figura modificada de Moura (2005).

Reescrevendo a Eq. (4.31) em função da configuração da Fig. (4.15), obtém-se, a relação expressa pela Eq. (4.32):

$$p_J(n) = \frac{1}{2} [p_J^{+NORTE}(n) + p_J^{+SUL}(n) + p_J^{+LESTE}(n) + p_J^{+OESTE}(n)] \quad (4.32)$$

Como visto anteriormente, as guias são elementos lineares bidirecionais, que podem assumir caráter unitário. Dessa forma, os valores de entrada na junta J, em um de instante n , são os mesmos valores de saída das juntas vizinhas, num instante imediatamente anterior, $n-1$. Assim sendo, valem as seguintes relações estabelecidas pela Eq. (4.33):

$$\begin{aligned} p_J^{+NORTE}(n) &= p_2^{-SUL}(n-1) & p_J^{+SUL}(n) &= p_4^{-NORTE}(n-1) \\ p_J^{+LESTE}(n) &= p_1^{-OESTE}(n-1) & p_J^{+OESTE}(n) &= p_3^{-LESTE}(n-1) \end{aligned} \quad (4.33)$$

Substituindo as relações acima na Eq. (4.32), têm-se outras duas expressões para a pressão na junta J, Eq. (4.34) e Eq. (4.35), respectivamente:

$$p_J(n+1) = \frac{1}{2} [p_2^{-SUL}(n) + p_1^{-OESTE}(n) + p_3^{-LESTE}(n) + p_4^{-NORTE}(n)] \quad (4.34)$$

$$p_J(n-1) = \frac{1}{2} \left[p_1^{+OESTE}(n) + p_2^{+SUL}(n) + p_3^{+LESTE}(n) + p_4^{+NORTE}(n) \right] \quad (4.35)$$

Somando as expressões da Eq. (4.34) e Eq. (4.35), é possível eliminar os termos que representam as porções de entrada e saída, restando apenas os valores totais de pressão nas juntas. Dessa forma, obtém-se o modelo matemático final aplicado às juntas de dispersão, na malha SWG, representado pela Eq.(4.36) (MOURA, 2005):

$$p_J(n) = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^4 p_i(n-1) \right] - p_J(n-2) \quad (4.36)$$

As unidades de células para a malha quadrada podem ser representadas por dois vetores, Vr1 e Vr2, assim como apresentados na Fig. 4.13. Usando a representação de vetores em colunas, (FONTANA E ROCCHESCO, 1995), obtém-se a Eq. (4.37):

$$(Vr1, Vr2) = \begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

A malha numérica, escrita em forma matricial, para indicar a posição do nó na malha é ilustrada na Fig. 4.16:



Figura 4.16 – Representação matricial da malha numérica quadrada.

Seja $A(i,j)$ um ponto do nó P , situado numa unidade de célula genérica localizado nos pontos (i,j) , é possível expressar o nó em posições cartesianas da seguinte forma, expresso pela Eq. (4.38), (CAMPOS, 2003):

$$A(i,j) \leftrightarrow iVr1 + jVr2 = i(d,0) + j(0,d) = d(i,j) \quad (4.38)$$

4.4.2 – Malha Triangular – Triangular Waveguide (TWG)

Fontana (2002) afirma que a malha quadrada apesar de ser muito prática e eficaz, apresenta problemas quanto ao erro de dispersão, devido à discretização dos caminhos de propagação da onda em apenas duas direções. Intuitivamente, a adição de mais direções de propagação poderia aprimorar a malha, daí surge a formulação triangular, que se decompõem em seis triângulos equiláteros, representados na Fig. 4.17.

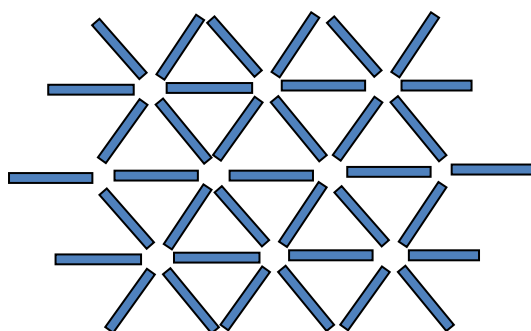


Figura 4.17 – Representação genérica de Guias Digitais de Ondas para formarem uma malha triangular.

Usando essa malha, os resultados numéricos são mais precisos e uniformes, além de demonstrar uma melhor representação do fenômeno de propagação de onda (FONTANA; ROCCHESO, 1995). Por outro lado, o processo de discretização das geometrias do problema se torna mais sofisticado, e requer uma implementação computacional mais criteriosa (BOAVENTURA, 2009). Para chegar a essa formulação, cada nó é conectado por 6 juntas de dispersão vizinhas via três atrasos temporais bidirecionais. Quando comparado com a malha SWG, as guias que estariam no eixo das coordenadas, são deslocadas em 30° , (BILBAO, 2001). Dessa maneira, permitindo a adição de mais uma direção de propagação, tal como apresentado na Fig. 4.18.

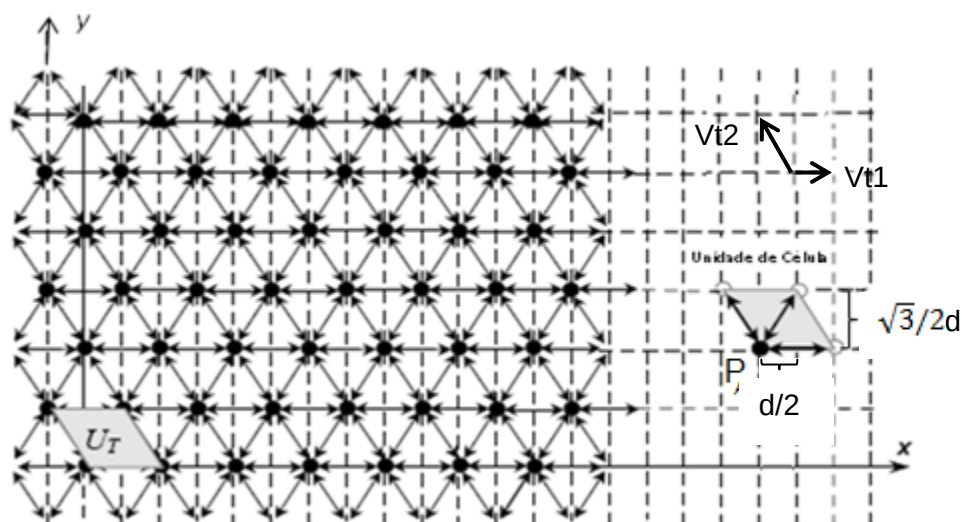


Figura 4.18 – Representação genérica de uma Malha Triangular - TWG. Figura modificada de Campos (2005)

Na Figura 4.18, os nós são representados pelos pontos e as guias são representadas pelo duplo sentido da seta. No canto direito da figura é possível ver um paralelogramo, que representa uma unidade de célula dessa topologia. A variável d equivale à distância internodal, sendo o ponto P_A um dos vértices do paralelogramo, e em negrito estão três unidades de atraso bidirecional temporal, que representam a propagação.

Uma configuração das Juntas de Dispersão para o caso TWG é representada como a Fig. 4.19:

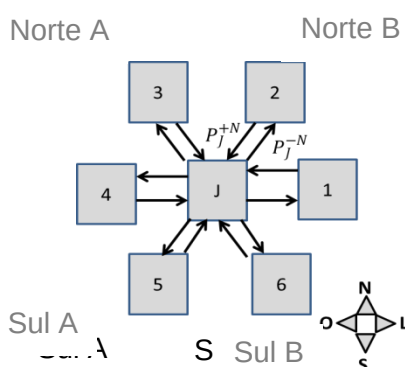


Figura 4.19 – Representação esquemática das Juntas de Dispersão na malha TWG. As porções $p+J$ e $p-J$ representam respectivamente as porções de entrada e saída na junta J , em direção a junta 2 (posicionada na região Norte).

Reescrevendo a Eq. (4.31) em função da configuração da Fig. 4.19, obtém-se a Eq. (4.39):

$$p_J(n) = \frac{1}{2} \left[p_J^{+NORTE_A}(n) + p_J^{+NORTE_B}(n) + p_J^{+SUL_A}(n) + p_J^{+SUL_B}(n) \right. \\ \left. + p_J^{+LESTE}(n) + p_J^{+OESTE}(n) \right] \quad (4.39)$$

Como visto anteriormente, as guias são elementos lineares bidirecionais, que podem assumir caráter unitário. Dessa forma, os valores de entrada na junta J, em um de instante n, são os mesmos valores de saída das juntas vizinhas, num instante imediatamente anterior, n-1. Assim sendo, valem as seguintes relações explicitadas na Eq. (4.40):

$$\begin{aligned} p_J^{+NORTE_A}(n) &= p_3^{-SUL_B}(n-1) \\ p_J^{+NORTE_B}(n) &= p_2^{-SUL_A}(n-1) \\ p_J^{+SUL_A}(n) &= p_5^{-NORTE_B}(n-1) \\ p_J^{+SUL_B}(n) &= p_6^{-NORTE_A}(n-1) \\ p_J^{+LESTE}(n) &= p_1^{-OESTE}(n-1) \\ p_J^{+OESTE}(n) &= p_4^{-LESTE}(n-1) \end{aligned} \quad (4.40)$$

Substituindo as relações acima na expressão da Eq. (4.38), têm-se outras duas expressões para a pressão na junta J, expresso pelas Eq. (4.41) e Eq. (4.42), respectivamente:

$$p_J(n+1) = \frac{1}{2} \left[p_2^{-SUL_A}(n) + p_3^{-SUL_B}(n) + p_1^{-OESTE}(n) + p_4^{-LESTE}(n) \right. \\ \left. + p_5^{-NORTE_B}(n) + p_6^{-NORTE_A}(n) \right] \quad (4.41)$$

$$p_J(n-1) = \frac{1}{2} \left[p_2^{+SUL_A}(n) + p_3^{+SUL_B}(n) + p_1^{+OESTE}(n) + p_4^{+LESTE}(n) \right. \\ \left. + p_5^{+NORTE_B}(n) + p_6^{+NORTE_A}(n) \right] \quad (4.42)$$

Assim como na malha SWG, ao somar as expressões acima, com o intuito de obter apenas os valores totais de pressão nas juntas, obtém-se a Eq. (4.43):

$$p_j(n) = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^6 p_i(n-1) \right] - p_j(n-2) \quad (4.43)$$

A malha numérica, escrita em forma matricial, para indicar a posição do nó na malha é ilustrada na Fig. 4.20:

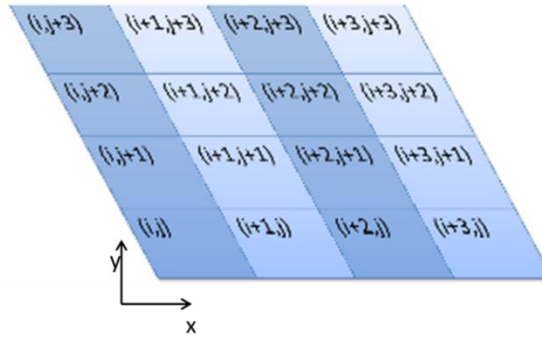


Figura 4.20 – Representação matricial da malha TWG.

Usando a mesma relação, apresentada na Eq.(4.37) é possível associar os vetores da Figura 4.19 e estabelecer a seguinte relação, Eq.(4.44):

$$(Vt1, Vt2) = \begin{bmatrix} d & -\frac{d}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}d \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Um nó expresso genérico, $A(i,j)$ em coordenadas cartesianas é dado pela Eq.(4.45):

$$A(i, j) \leftrightarrow iA(0,0) + iVt1 + jVt2 = d \left[\frac{1}{2}(2i - j), \frac{\sqrt{3}}{2}j \right] \quad (4.45)$$

A próxima sessão descreverá algumas malhas usadas para simular os casos tridimensionais.

4.5 Malha 3-Dimensional de Guias Digitais de Ondas

A aplicação de modelos bidimensionais para simulações de membranas e instrumentos de percussão têm apresentado bons resultados, conseguindo reproduções sonoras com riqueza e naturalidade, Campos e Howard (2000). Levando isso em conta, a ideia de elaborar malhas tridimensionais logo surgiu como um grande potencial na simulação de salas acústica. Assim sendo, duas malhas (Cúbica e Tetraédrica) representantes de casos tridimensionais serão abordadas nos itens a seguir.

4.5.1 – Malha Cúbica – Cubic Waveguide (CWG)

Matematicamente, o caso 3D é uma expansão da formulação desenvolvida para os casos SWG e TWG para o caso bidimensional. Como é possível observar, todas as formulações desenvolvidas resultaram numa equação n-dimensional, que foi manipulada de acordo com o número de vizinhos estabelecido em cada geometria de malha. Assim sendo, com o acréscimo de novos elementos ao longo de uma nova dimensão, é o bastante para a obtenção de uma malha que se aplique ao caso tridimensional. Porém, existe uma regularidade na malha que deve ser respeitada para garantir os critérios de estabilidade e convergência de quaisquer aplicações baseadas em sistemas de equações de Diferenças Finitas (TAYLOR, 2012)

A estrutura da malha cúbica, ilustrada na Fig. 4.21, é obtida por várias camadas de malhas SWG alinhadas umas com as outras, sendo que cada junta de dispersão passa a contar com seis nós vizinhos. Essa é provavelmente a maneira mais simples de estender o algoritmo de guias digitais de ondas para três dimensões, (CAMPOS, 2003). Isso porque cada nó é capaz de se comunicar diretamente com os seus vizinhos, via unidades de atraso ao longo das direção x, y e z, assim é possível simular o sinal de propagação na malha 3D.

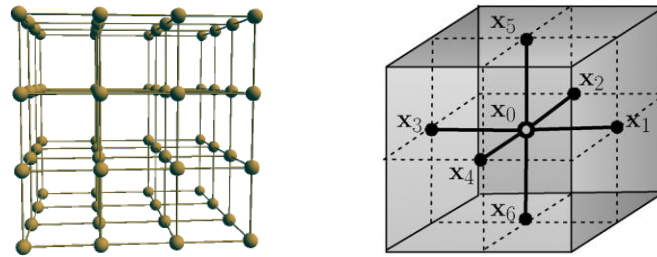


Figura 4.21 – Representação esquemática da malha cúbica 3D no canto esquerdo. No lado direito, está representada a unidade de célula dessa geometria, sendo que a distância entre os nós é expressa por d . Essa célula é caracterizada por três unidades de atraso bidirecional ao longo dos eixos x , y e z .

Uma configuração das Juntas de Dispersão para o caso CWG é representada como a Fig. 4.22:

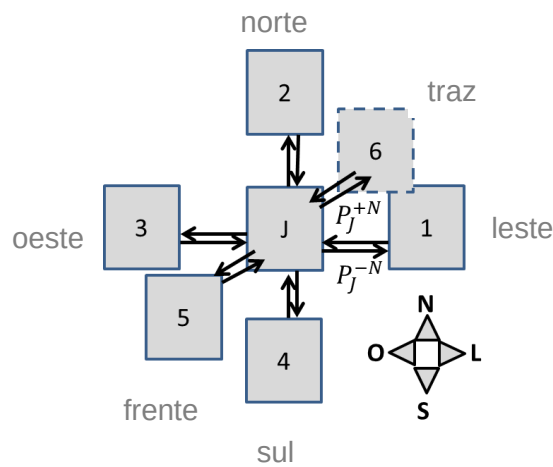


Figura 4.22 – Representação esquemática das Juntas de Dispersão na malha CWG.

Da Figura 4.22, as porções P_J^+ e P_J^- representam respectivamente as porções de entrada e saída na junta J , em direção a junta 1 (posicionada na região leste). O cálculo da pressão na junta do caso CWG pode ser obtido reescrevendo a Eq. (4.31) em função da configuração da Fig. 4.22, a Eq.(4.46):

$$p_J(n) = \frac{1}{3} \left[p_J^{+NORTE}(n) + p_J^{+SUL}(n) + p_J^{+FRENTE}(n) + p_J^{+TRAZ}(n) \right. \\ \left. + p_J^{+LESTE}(n) + p_J^{+OESTE}(n) \right] \quad (4.46)$$

Os valores de entrada na junta J, em um de instante n, são os mesmos valores de saída das juntas vizinhas, num instante imediatamente anterior, n-1. Assim sendo, valem as seguintes relações, conforme expresso pela Eq. (4.47):

$$\begin{aligned} p_J^{+NORTE}(n) &= p_2^{-SUL}(n-1) \\ p_J^{+SUL}(n) &= p_4^{-NORTE}(n-1) \\ p_J^{+FRENTE}(n) &= p_5^{-TRAZ}(n-1) \\ p_J^{+TRAZ}(n) &= p_6^{-FRENTE}(n-1) \\ p_J^{+LESTE}(n) &= p_1^{-OESTE}(n-1) \\ p_J^{+OESTE}(n) &= p_3^{-LESTE}(n-1) \end{aligned} \quad (4.47)$$

Substituindo as relações acima na expressão da Eq. (4.46), têm-se outras duas expressões para a pressão na junta J, Eq. (4.48) e Eq.(4.49):

$$p_J(n+1) = \frac{1}{3} \left[p_2^{-SUL}(n) + p_4^{-NORTE}(n) + p_5^{-TRAZ}(n) + p_6^{-FRENTE}(n) \right. \\ \left. + p_1^{-OESTE}(n) + p_3^{-LESTE}(n) \right] \quad (4.48)$$

$$p_J(n+1) = \frac{1}{3} \left[p_2^{+SUL}(n) + p_4^{+NORTE}(n) + p_5^{+TRAZ}(n) + p_6^{+FRENTE}(n) \right. \\ \left. + p_1^{+OESTE}(n) + p_3^{+LESTE}(n) \right] \quad (4.49)$$

Da relação entre as Eq. (4.48) e (4.49) é possível obter a pressão sonora numa junta de dispersão, tal como apresentado pela Eq.(4.50):

$$p_J(n) = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^6 p_i(n-1) \right] - p_J(n-2) \quad (4.50)$$

A distância entre os nós é estabelecida por, Eq. (4.51) (SMITH, 1992):

$$X = \frac{c\sqrt{3}}{f_s} \quad (4.51)$$

A malha numérica, escrita em forma matricial, para indicar a posição do nó na malha é ilustrada na Fig. 4.23:

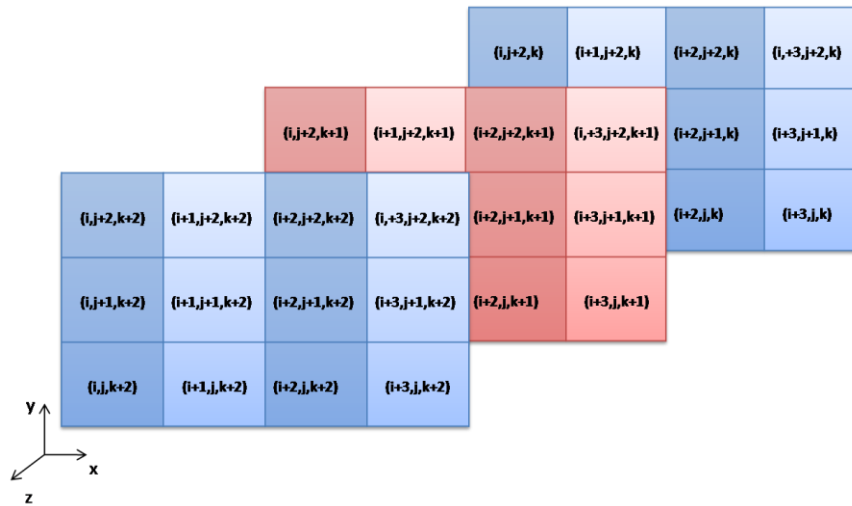


Figura 4.23 – Representação da malha numérica cúbica.

Os nós escritos em coordenadas cartesianas para uma malha cúbica é dado pela Eq.(4.52):

$$P(i, j, k) = d(i, j, k) \quad (4.52)$$

4.5.2 – Malha Tetraédrica – Tetrahedral Waveguide Mesh (TWM)

Outro modelo bastante difundido para a propagação 3-D trata-se da malha do tipo tetraédrica, Fig. 4.24. De acordo com Campos e Howard (2000) tal arranjo foi proposto pelos precursores da técnica e a ideia básica da distribuição dos nós na malha é muito semelhante ao arranjo molecular da estrutura de um diamante, onde o posicionamento das juntas de dispersão corresponde ao posicionamento das estruturas moleculares dos carbonos, (Van Duyne & Smith III, 1995).

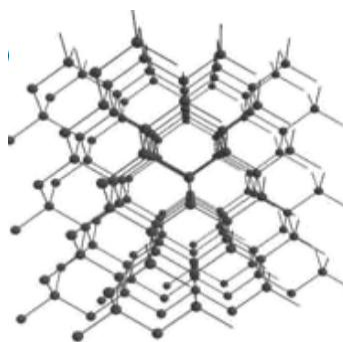


Figura 4.24 – Representação esquemática da malha tetraédrica, 3D.

Nessa geometria, quatro pontos vizinhos do nó são vértices de um cubo, cujo centro é dado pelo nó. O ângulo α_{malha} entre os pontos de ligação é $2\arctan\sqrt{\alpha_{\text{malha}}}$ é de aproximadamente, $109,47^\circ$ e a distância internodal é d , é relacionada com a altura lateral do cubo, s_{cubo} é dado pela Equação (4.53):

$$d = \frac{\sqrt{3}s}{2} \quad (4.53)$$

A Figura 4.25 (A) apresenta uma unidade de célula tetraédrica, além de dois cortes, Figura 4.25 (B) mostrando a vista do plano e a vista frontal da unidade de célula, Figura 4.25 (C).

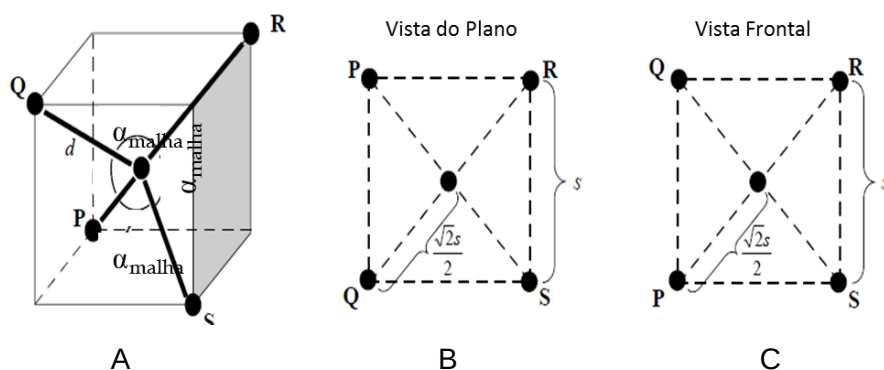


Figura 4. 25 – (A) Geometria da Malha Tridimensional Tetraédrica e (B) vista do plano da malha. (C) vista frontal da malha, figura obtida em Romeiro (2011).

As unidades de atraso da malha são alinhadas com outras para formarem quatro eixos de propagação, assim como aparece na Fig. 4.26. Para facilitar o entendimento, os quatro eixos de propagação estão numerados.

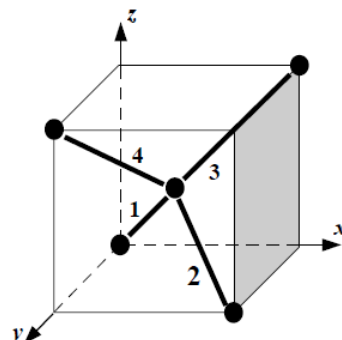


Figura 4.26 – Eixos de propagação da malha.

Da Figura 4.26 é possível obter a seguinte relação dos pontos no eixo cartesiano, descrito pela Eq. (4.54):

$$\begin{aligned}
 1. & x = y = z \\
 2. & x = y = -z \\
 3. & x = -y = z \\
 4. & -x = y = z
 \end{aligned}
 \tag{4.54}$$

A unidade de célula dessa malha é representada por uma estrutura cúbica, assim como mostrado na Fig. 4.27.

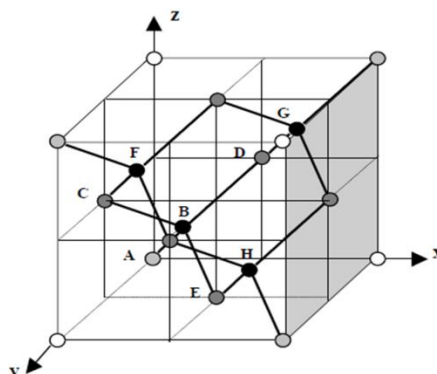


Figura 4.27 – Unidade de célula da Malha tetraédrica, figura obtida em Campos (2008).

Os nós A, C, D e E são verticalmente opostos aos nós B, F, G e H, (CAMPOS, 2003). A malha é formada por unidades de células posicionadas de forma adjacente uma a outra, como mostrado na Fig. 4.28, (SMITH, 1992), (SAVIOJA; LOKKI; HUOPANIEMI, 2002):

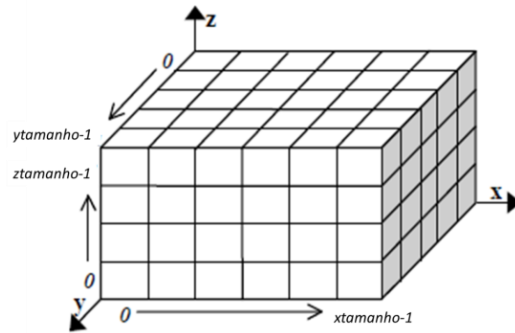


Figura 4.28 – Malha tridimensional tetrédrica formada pelo arranjo das unidades de células.

Campos e Howard (2000), Siltanen, Lokki e Savioja (2010) fazem uma relação para encontrar as coordenadas genéricas de uma unidade de célula numa representação do plano cartesiano (x.y.z), chegando à seguinte conclusão, Eq. (4.55):

$$\begin{aligned}
 A(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (0,0,0); \\
 B(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (s/2, s/2, s/2); \\
 C(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (0, s, s); \\
 D(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (s, 0, s); \\
 E(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (s, s, 0); \\
 F(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (s/2, 3s/2, 3s/2); \\
 G(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (3s/2, s/2, 3s/2); \\
 H(i, j, k) &\rightarrow 2s(i, j, k) + (3s/2, 3s/2, s/2);
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
 0 \leq i \leq x_tamanho, 0 \leq j \leq y_tamanho, 0 \leq k \leq z_tamanho, \\
 2s = u
 \end{aligned}$$

Sendo u o tamanho da borda da unidade de célula

Campos (2003) apresenta um diagrama, Fig. 4.29, em que estão configuradas as posições relativas dos seis vizinhos da unidade de célula que trocam informações com uma unidade de célula genérica.

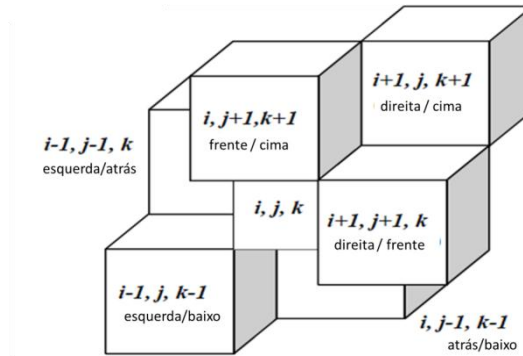


Figura 4.29 – Posição relativa dos seis vizinhos da unidade de célula.

Assim, é necessário aplicar as relações estabelecidas pela Eq. (4.55) na Fig. 4.29 para calcular a pressão sonora, tal como é apresentado pela Eq. (4.56):

$$p_J(n) = \frac{1}{4} \left[\sum_{i=1}^8 p_i(n-1) \right] - p_J(n-2) \quad (4.56)$$

O próximo tópico discorre sobre o erro de dispersão, um problema relacionado ao posicionamento correto dos nós na malha.

4.6 – Erro de Dispersão

Um fator que deve ser levado em conta no momento da simulação é quanto ao erro de dispersão. Isso porque de forma geral, as malhas de guias digitais de ondas são limitadas pelo erro de dispersão, uma vez que a velocidade de propagação da onda é dependente tanto da frequência, quanto da direção de propagação. O grau de dispersão tem uma relação direta com a topologia da malha que está sendo investigada. A Fig. 4.30 apresenta as restrições quanto à discretização dos caminhos de propagação bidimensional da onda. Apenas recordando, que para o caso bidimensional, a malha do tipo SWG apresenta apenas duas direções e em consequência, não consegue captar de forma eficaz as informações, tal como ocorre na propagação real, ou seja, que abrange todas as direções.



Figura 4.31 – Representação esquemática das direções de propagação das ondas na malhas SWG e TWG, respectivamente A e B. As retas pontilhadas indicam as direções preferenciais de propagação. Figura modificada de Moura (2005).

A Figura 3.31 (A) e a Figura e 3.32(B) mostram as direções de propagação de ondas nas malhas SWG e TWG, definidas ao longo das guias de ondas. A velocidade nominal de propagação da onda na malha é expressa pela Eq. (4.57):

$$c_n = c\sqrt{2} \quad (4.57)$$

Esse parâmetro se refere à velocidade com que a onda se propaga ao longo das guias. Através de uma amostragem ao longo da direção de 45°, esse parâmetro de velocidade passa a ter o mesmo valor da velocidade real de propagação da onda sonora, conforme mostrado na Fig. 4.31 (A) e representado pelas linhas pontilhadas. Estes diferentes valores de propagação sobre a malha geram um erro numérico, conhecido como erro de dispersão

A malha TWG é representada no lado B da Fig. 4.31, a velocidade nominal de propagação da onda possui o mesmo valor da Eq. (4.57). A mesma análise pode ser estendida para as direções de 30° e 90°, a fim de obter uma velocidade nominal igual à velocidade real de propagação da onda sonora.

Cada topologia de malha é caracterizada por um modelo específico de dispersão. Para o caso 2D, a malha triangular leva vantagem com relação as outras geometrias, devido ao aumento da direção de propagação na malha, acarretando numa menor variação do erro de dispersão. Fontana e Rocchesso (1995) fizeram uma análise quanto ao erro de dispersão nas malhas e chegaram à conclusão de que um valor aproximado do que seria o erro de dispersão máximo cometido pela malha SWG seria de 30% e de 15% para a malha TWG.

No caso da análise tridimensional, em particular, a malha cúbica apresenta o erro de dispersão muito semelhante ao da SWG, 2D, isso também se deve às certas direções preferenciais, que nesse caso, também ocorre ao longo da direção de 45° . Na verdade, a malha cúbica trata-se de uma malha quadrada adicionada em uma dimensão. A Fig. 4.32 (A) e Fig.4.32 (B) mostra com detalhes o erro que ocorre na propagação tridimensional confrontando o erro na malha cúbica e na malha tetraédrica.

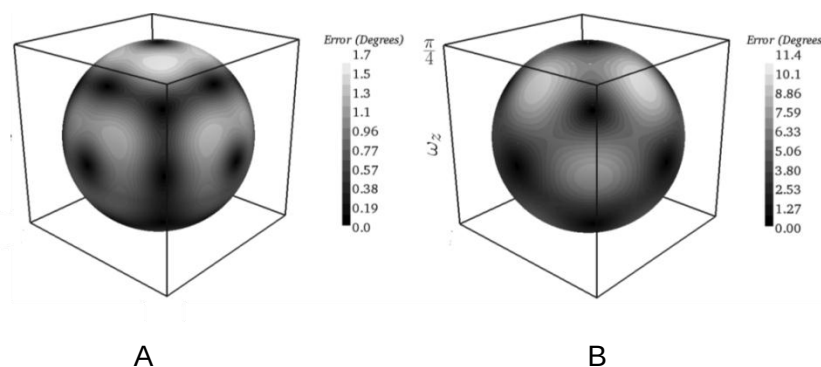


Figura 4.32 – Representação do erro de dispersão na malha cúbica (A) e da tetraédrica (B). Figura Modificada de Hacıhabiboglu, Gunel e Cvetkovic (2010)

Como é possível observar nas figuras acima, as esferas apresentam algumas regiões mais escuras, que são formadas ao longo da direção preferencial. Como é possível notar, a velocidade real de propagação, coincide com a velocidade de propagação nessa região de 45° e como nas outras direções, por exemplo, 0° e 90° , a informação chega num tempo anterior, causando o erro de dispersão.

Dessa forma é possível constatar a influência da geometria da malha sobre o erro de dispersão. Como esperado, as figuras revelam que o erro de dispersão na malha TWG é menor do que na malha SWG, devido ao fato da malha ter um maior número de direções preferenciais de movimento, para o caso bidimensional.

Muitos autores dedicaram seus esforços na análise do erro de dispersão das Malhas de Guias Digitais de Ondas, dentre os quais é possível citar: Savioja e Valimak (1999), Moura (2005) e Campos (2003). Segundo eles esse problema pode ser contornado aumentando a densidade da malha, que é determinada pela distância internodal e que por sua vez está diretamente ligada a frequências de amostragem dos sinais de áudio. Dessa forma, quanto maior for a densidade, melhor será a resolução, em contrapartida, maior será o custo computacional.

CAPÍTULO V

Simulações

Esse capítulo se destina a apresentar e analisar o desempenho da técnica de Malhas de Guias Digitais de Ondas em situações variadas, permitindo vislumbrar a potencialidade dessa técnica no prognóstico de campos reverberantes.

Os modelos numéricos aqui propostos são constituídos por fonte do tipo pontual que excitam o ambiente de maneira transiente, tal como um impulso, com o intuito de obter a Resposta ao Impulso e conseqüentemente, o comportamento do mesmo ou ainda em outras palavras, a característica aural do recinto.

No escopo das simulações foram realizadas duas abordagens distintas: comparação da técnica de Malha de Guias Digitais de Ondas com ao Método de Elementos Finitos para obter o perfil do comportamento acústico das salas virtuais, avaliando principalmente o impacto relativo ao custo computacional de processamento. A segunda etapa concentrou-se em realizar simulações em ambientes com ou sem barreira, explorando diferentes geometrias de malhas, além da aplicação da técnica em processos de auralização. Alguns códigos gerados estão presentes no Apêndice 1 desse trabalho

5.1 – DWG *versus* Elementos Finitos

A primeira investigação se deu na investigação da eficiência da técnica em detrimento às outras técnicas, que também são baseadas no comportamento da onda

Por se tratar de uma abordagem muito aceita pela academia, a técnica de Elementos Finitos foi escolhida.

Fazendo uma análise bidimensional, uma sala hipotética de dimensões 4x3 [m] foi modelada usando uma malha quadrada, SWG e o Método de Elementos Finitos, por meio de malhas quadradas. A fonte sonora, representada pelo círculo na Fig.5.1 está situada no canto inferior esquerdo distante 0.5 [m] de cada parede. A resposta impulsiva é medida num ponto situado no canto superior direito da sala, distante 0.5 m das paredes. A Fig. 5.1 ilustra a representação física da simulação.

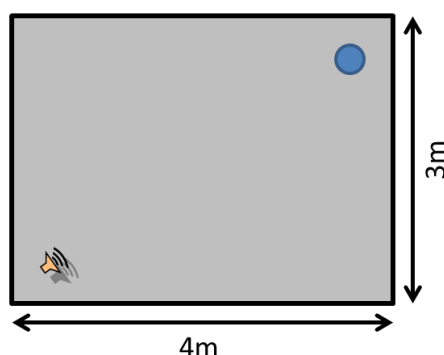


Figura 5.1 – Representação esquemática da sala usada para calcular a RIR através da SWG e do elemento Fluid 29 com malha quadrada do pacote comercial Ansys®.

Para simular a técnica de Guias Digitais de Ondas, a impedância nas bordas da malha foi configurada para permitir condições de paredes rígidas e o coeficiente de absorção foi ajustado em 0.1. A frequência de atualização da malha foi configurada em 1000 Hz e a distância entre os nós de 0.02 m. Como sinal de entrada foi gerado um seno com frequência de 100 Hz. O modelo de Elementos Finitos foi resolvido usando o Ansys® por meio do elemento *Fluid 29* e com o ajuste de malha quadrada, com o intuito de obter resultados mais aproximados. Executando os códigos numa mesma plataforma a mesma configuração o tempo de simulação do processo foi de 3 segundos, sendo que a SWG alcançou o resultado com 8 minutos e o MEF gastou 50 minutos, para obterem os resultados, respectivamente.

A Figura 5.2 (A) e Figura (B) mostram o exato momento em que a fonte está em funcionamento.

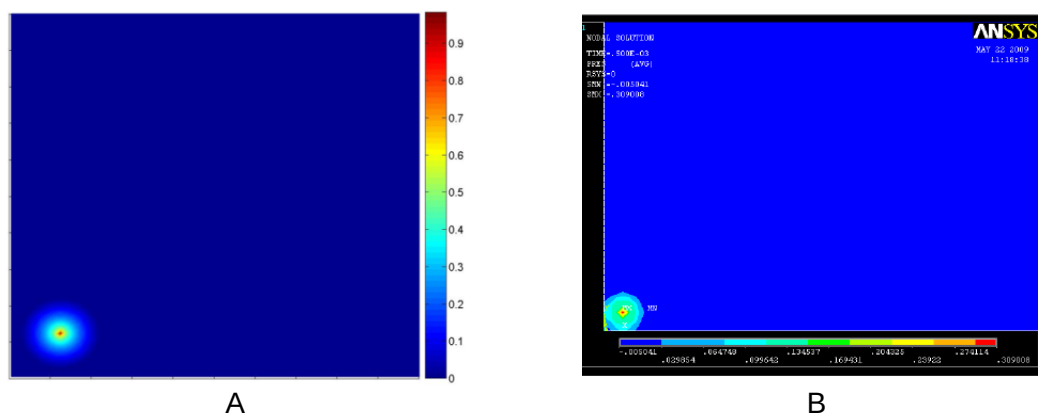


Figura 5.2 – Simulação da resposta impulsiva usando Guias Digitais de Ondas (A) e métodos de Elementos Finitos (B)

A Figura 5.3.(A) e Figura 5.3 (B) mostram o momento em que a fonte é desligada. Note que mesmo com a suspensão da injeção sonora, a energia sonora continua se dissipando no sistema.

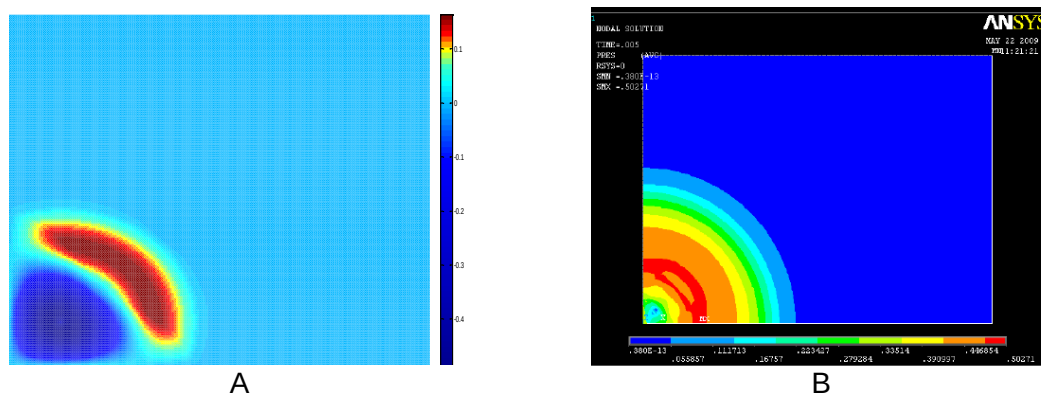


Figura 5.3 – Momento em que a fonte é desligada. (A) representação da SWG e (B) resultado em Elementos Finitos.

Como é possível observar e respeitando a diferença nas escalas de cores, os resultados do gráfico da propagação sonora foram semelhantes. Para prosseguir com a investigação, dois sensores foram distribuídos pela sala, sendo que um posicionado na fonte e outro no receptor, respectivamente, Fig. 5.4 A e Fig. 5.4 B.

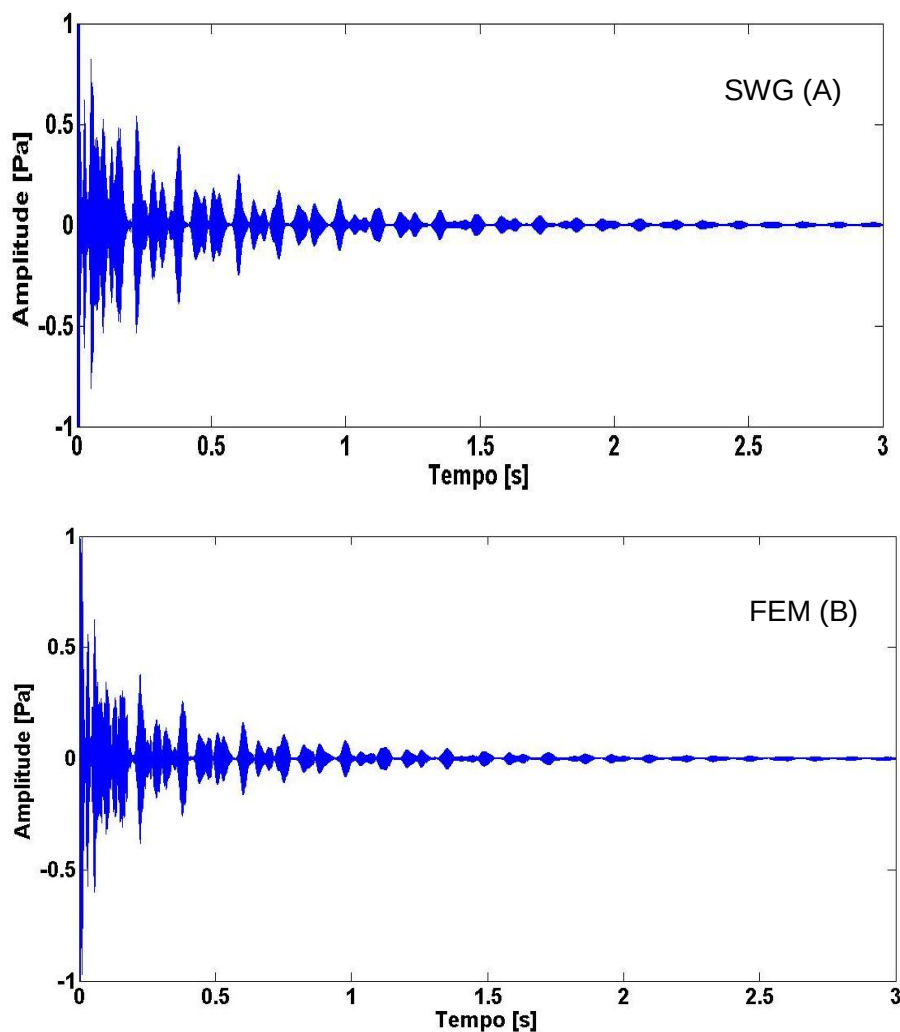


Figura 5.4 – Medição da resposta impulsiva na posição da fonte (A) para o caso de Malhas de Guias Digitais de Ondas e (B) representa o Método de Elementos Finitos.

Como esperado, o gráfico de energia acústica da fonte, na Fig. 5.4 A e Fig. 5.4 B têm um pico mais acentuado no início e logo em seguida essa energia vai sendo atenuada. A Fig. 5.5 A. e Fig. 5.5 B por sua vez, representam o sinal atingido pelos receptores nas análises via SWG e FEM, respectivamente.

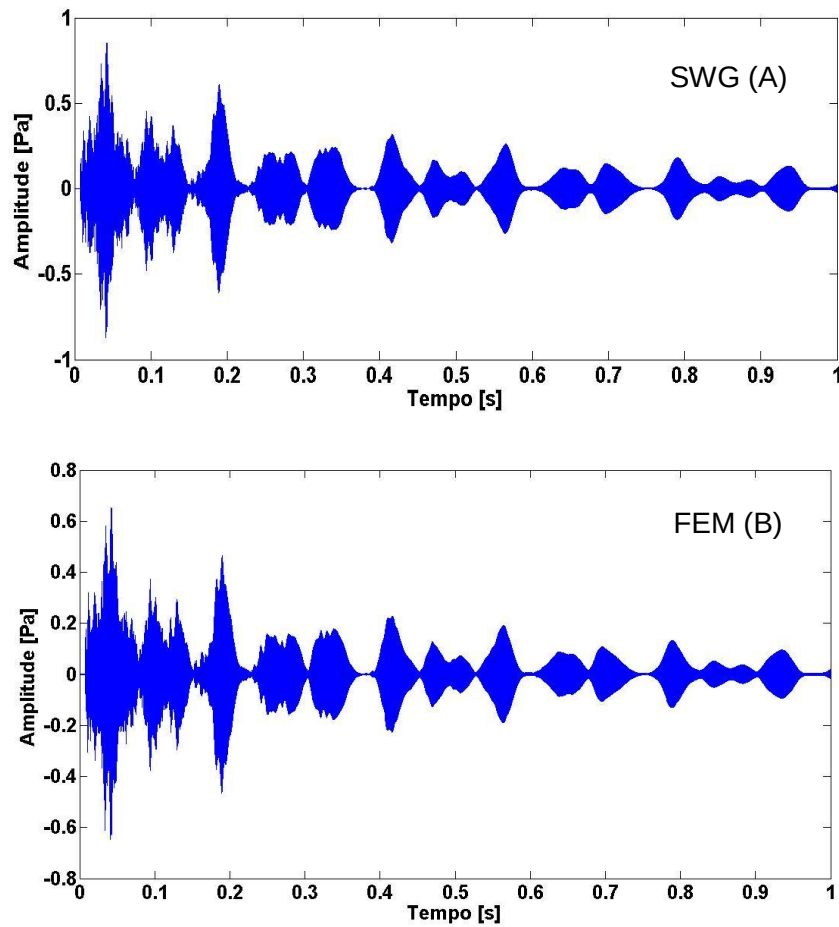


Figura 5.5 – Medição da resposta impulsiva no receptor. (A) para o caso de Malhas de Guias Digitais de Ondas e (B) representa o Método de Elementos Finitos.

Nos gráficos da Fig. 5.5 (A) e Fig. 5.5 (B) a energia sonora chega ao receptor de forma dissipada, porque sofre atenuação das paredes.

Para comparar os dois métodos, foram feitos os cálculos dos Tempos de Reverberação.

O próximo passo concentrou-se em calcular o valor eficaz, ou seja, o valor RMS (*Root Mean Square* – Valor Quadrático Médio). Para isso, a média exponencial, $\bar{x}_{RMS}$ é calculada de acordo com a Eq. (5.1).

$$\bar{x}_{RMS}^{-2} = x_{RMSi-1}^2 + (x_{RMSi}^2 + x_{RMSi-1}^2) / cte \quad \text{Eq.(5.1)}$$

Onde:

x_{RMS} é o i-ésimo termo do vetor $\vec{x}_{RMS}$ e cte é dado pela Eq. (5.2).

$$cte = F_{aquis}T + 1 \quad \text{Eq.(5.2)}$$

Onde F_{aquis} é a frequência de aquisição em [Hz], nesse caso em 1K Hz e T é o tempo, nesse caso, de integração. Para esse trabalho T foi configurado como 0,045 [s], correspondendo a um tempo de integração *impulse*, semelhante ao tempo de integração do ouvido humano para esse tipo de estímulo. Isso permite então um esquecimento das ocorrências passadas no sinal analisado, (Nunes, 2009).

Para descrever a pressão sonora numa escala logarítmica é necessário recorrer à Eq.(5.3).

$$NPS = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad \text{Eq.(5.3)}$$

Onde P é a pressão sonora do sinal já em RMS (nesse caso) e P_0 é a pressão sonora de referência, $2 \cdot 10^{-5}$ [N/m²].

Fazendo uma regressão linear num dos sinais obtido através da Eq.(5.3) e apresentado na Fig. 5.6 (A) e Fig. 5.6 (B) é possível estimar o TR_{60} obtido via DWG e Método de Elementos Finitos, respectivamente.

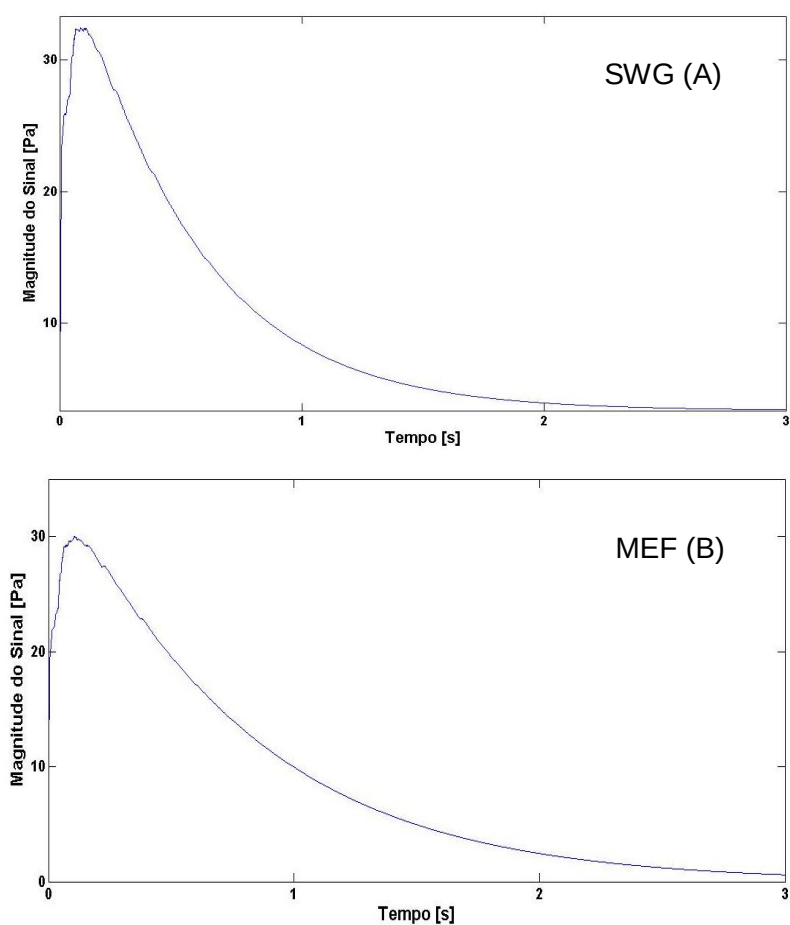


Figura 5.6 – Tempo de Reverberação no receptor. (A) para o caso de Malhas de Guias Digitais de Ondas e (B) representa o Método de Elementos Finitos.

Ao fazer a regressão linear entre os gráficos, os valores do TR60 ficaram próximos, 0,85 [s] e 0,8 [s], respectivamente para SWG e FEM. Indicando a aproximação das duas técnicas.

Ainda no escopo da malha SWG é importante destacar o erro de dispersão da malha SWG. A Fig. 5.7 mostra nitidamente através das setas sobrepostas a figura, como esse erro pode influenciar no resultado da simulação.

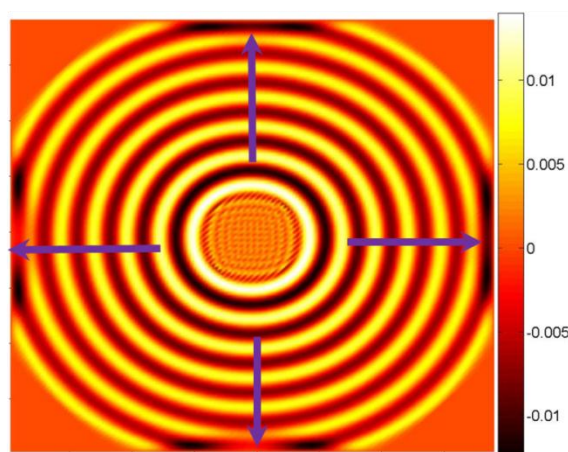


Figura 5.7 – Medição da resposta impulsiva no receptor.

O problema que ocorre no resultado da simulação é que nos pontos indicados pelas setas, a propagação proveniente da fonte já alcançou as paredes e parte da energia já está sendo refletida novamente para o meio. Já na direção preferencial de propagação, ou seja, 45° , a informação ainda está sendo transmitida e não alcançou o obstáculo. Esse erro ocorre, porque na simulação da malha SWG a informação, que se trata de uma propagação esférica, está sendo simulada pela malha quadrada. Assim, geometricamente, o problema pode ser interpretado como um círculo circunscrito, ou inscrito num quadrado.

Uma solução apresentada para amenizar esse erro de dispersão, como já tratado no Capítulo 4, sessão 4.6 é o aumento da densidade da malha, ou usar outras geometrias de malha, como a malha triangular. Em contrapartida, aumenta-se o custo de processamento das simulações.

5.2 – Geometrias de Malhas de DWG

Esse tópico discute as simulações feitas em diferentes geometrias de malhas, observando as influências que a escolha da malha e a presença dos obstáculos inseridos na análise exercem no resultado final. A geração da Resposta Impulsiva da Sala, captação da Resposta Binaural Impulsiva da Sala (*Binaural Room Impulse Response – BRIR*) e o processamento dos sinais obtidos, para filtrar em bandas de frequência também se fizeram presentes nesse momento. Por fim, foi realizado a

auralização inteiramente computacional, obtendo um sinal sonoro audível e capaz de carregar as pistas espaciais do espaço virtual.

Para finalizar as análises de salas acústicas empregando a técnica de Guias Digitais de Ondas, partiu-se para a obtenção de arquivos de áudio. Nesse trabalho estão contempladas as malhas bi e tridimensionais e maiores detalhes serão apresentados nas sessões a seguir.

5.2.1 – Malha Bidimensional SWG

Para essa análise aplicou-se um sinal digital de entrada gravado obtido através da ferramenta “Gravador de Som” e do próprio microfone instalado em um notebook HP *Pavilion*, com processador AMD Turion™ X2 Dual-Core Mobile RM-72 e com 4GB de RAM. Nesse sinal, o narrador interpreta o seguinte texto:

"Alô, estamos testando auralização."

Este sinal foi utilizado na operação de convolução com as respostas impulsivas e obtidas pelos sensores ou canais *L (left)* e *R (right)*, a partir da simulação da sala indicada na Figura 5.7. Para gerar a RIR através da SWG uma sala bidimensional de 7 x 4 [m] foi submetida ao impulso durante o tempo de 2s, sendo a fonte posicionada no ponto (3,3) e o par receptor, para captar o sinal binaural, situa-se em (6.5, 3.50) e (6.5,3.65), respectivamente. A Fig. 5.8 representa o esquema do problema físico:

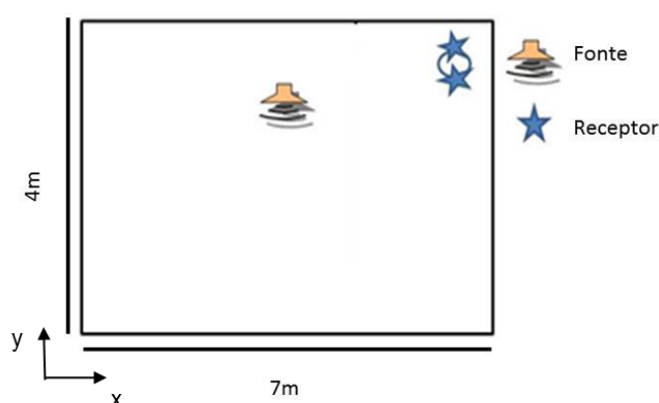


Figura 5.8– Representação da sala usada para simulação da malha SWG.

Como sinal de entrada para o sistema, uma aproximação da função Delta de Dirac foi representado por uma meia onda com frequência de 4096 [Hz], amplitude de 1 [Pa] e tempo de ativação na ordem de 2.44×10^{-4} [s].

Para a concatenação das guias, com o intuito de criar a malha, a distância entre os nós foi estabelecida de acordo com a Eq. (4.30), sendo que a velocidade de propagação do meio foi ajustada em 342 [m/s], número de direções da malha ($N=2$) e a frequência de atualização da malha, f_s em 16.384 [Hz].

Com a finalidade de criar uma situação mais próxima da realidade, os coeficientes de absorção foram variados segundo as bandas de frequência de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 [Hz], durante o tempo de 2 [s], captando o sinal direto e as primeiras reverberações. A cada simulação, os quatro obstáculos foram projetados para representar o mesmo material, em outras palavras, com o mesmo coeficiente de absorção. Os valores de absorção em bandas de oitava de frequência são mostrados na Tab.5.1:

Tabela 5. 1: Valores hipotéticos dos coeficientes de absorção dos obstáculos.

Frequência em Bandas	Coefficiente de Absorção (%)
125	5
250	10
500	12
1000	15
2000	17
4000	20

Depois que a fonte para de injetar energia no sistema, o campo sonoro começa a ser dissipado com grande contribuição dos obstáculos inseridos na análise. A Fig. 5.9 mostra o sinal RIR captado no ponto receptor situado nas coordenadas (6.5, 3.65) da sala. Essa figura mostra três RIR, respectivamente para a frequência de 125, 2000 e 4000 Hz:

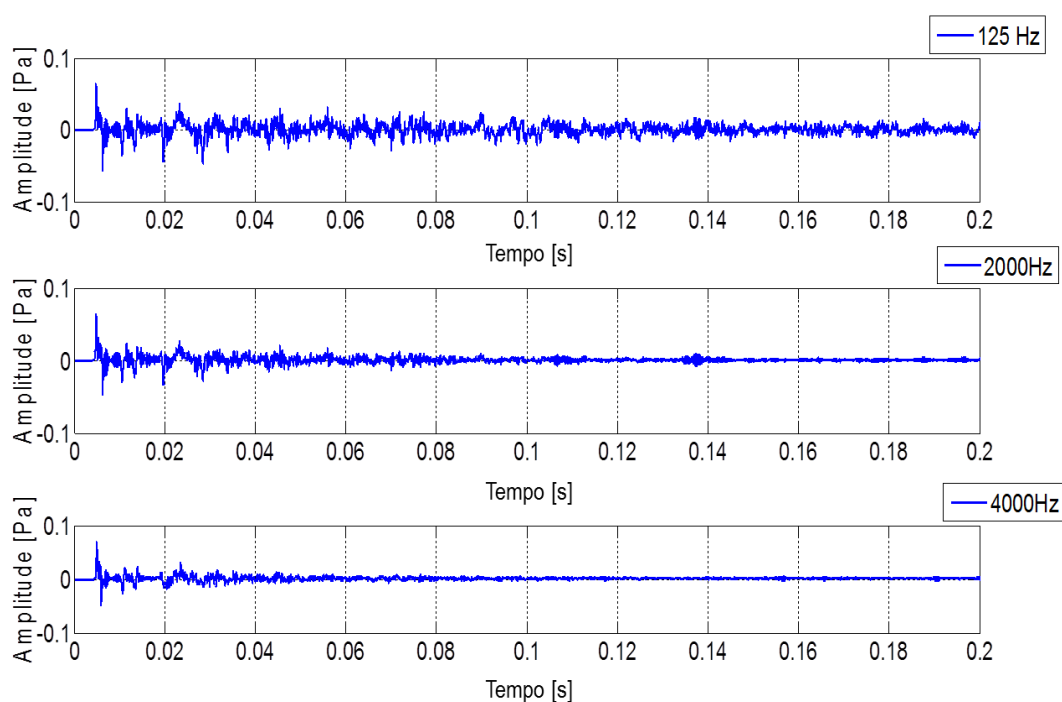


Figura 5.9 – Sinal de diferentes sinais RIR num dos pontos receptores.

Conforme o esperado, o sinal fica mais atenuado em frequências mais altas, devido ao aumento do coeficiente de absorção, imposto no sistema. Na sequência, o sinal RIR foi filtrado usando o filtro IIR do tipo butterworth de quarta ordem, através da função *butter* do Matlab®. A grande vantagem desse tipo de filtro é apresentar uma resposta muito plana na banda passante e por se aproximar de zero, nas demais bandas. A Fig. 5.10 mostra três bandas de frequência do sinal filtrado, respectivamente 125, 2000 e 4000 [Hz]:

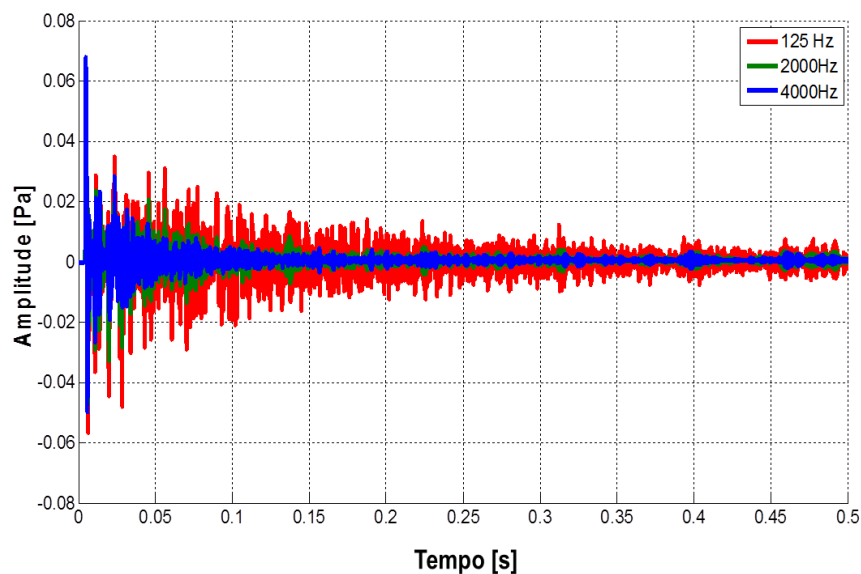


Figura 5.10 – Representação do sinal nas três bandas de frequência já filtradas através do filtro do tipo butterworth.

Na sequência, a análise se dá através dos sinais binaurais, ou seja, após fazer o tratamento de cada resposta impulsiva e em cada banda, os sinais binaurais são adquiridos a fim de se fazer a representação da audição binaural. A Fig. 5.11 mostra a superposição dos sinais binaurais obtidos e já filtrados:

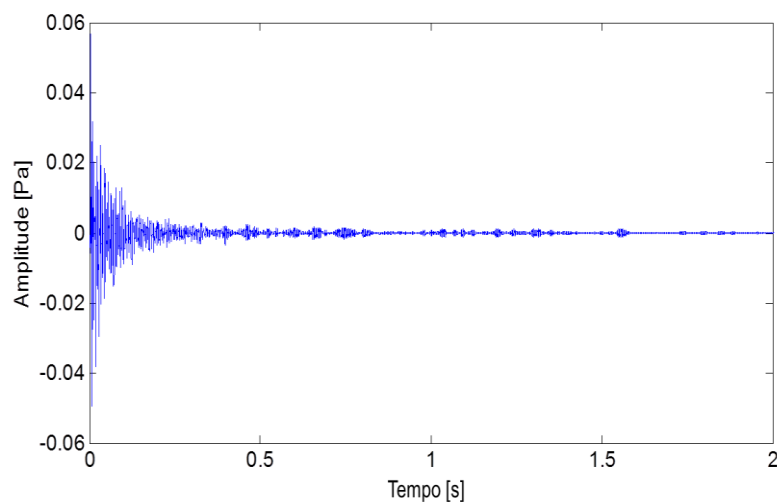


Figura 5.11 – Somatório dos sinais referente às seis bandas já filtradas.

O procedimento de geração da RIR e obtenção da BRIR foi realizado seis vezes, variando os coeficientes de absorção, para representar as diferentes bandas de frequência. Cada sinal foi filtrado em filtros de bandas de oitava e a soma das componentes filtradas foram convoluídas com outros sinais de áudio, representado na Fig.5.12, representado pelo gráfico de sinal original e o resultado da convolução é mostrada na sequência, da figura intitulada Convolução (receptor).

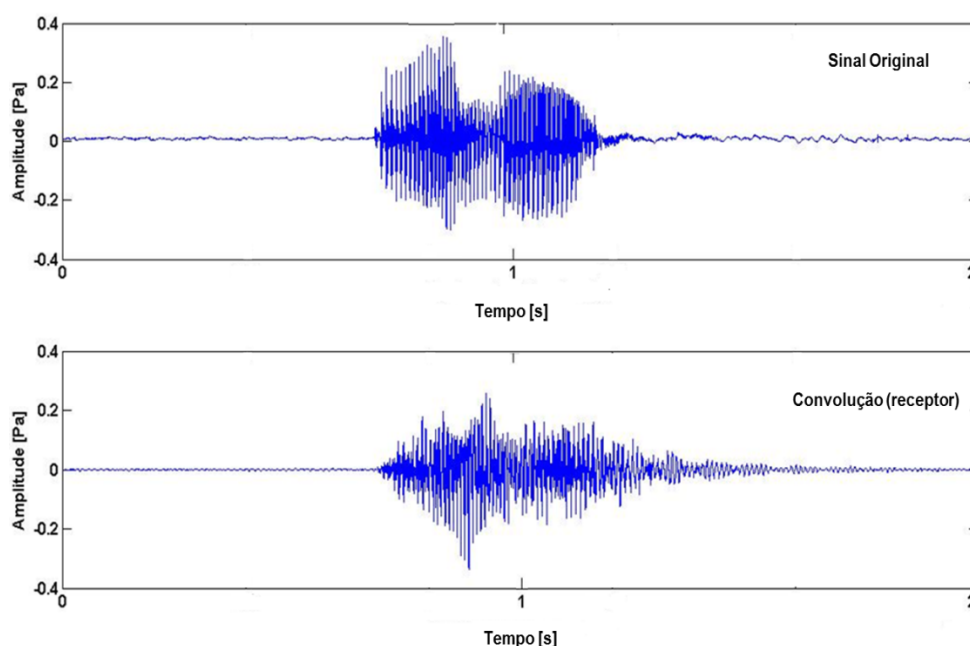


Figura 5.6 – Sinal Original e convoluído, respectivamente.

Conforme é possível observar na Fig. 5.12, o sinal convoluído entre a RIR obtida no ponto receptor e o sinal original, sofre atenuação e se mostra mais atenuado em função da reverberação imposta pelo ambiente. Diferentemente do sinal original, que apresenta amplitudes de onda maiores em função da não interferência do meio na reprodução dessa amostra de áudio. Ao reproduzir em fones de ouvido as amostras de áudio dessa simulação, constatou-se um ruído que de acordo com a literatura é proveniente do erro da dispersão da malha do tipo quadrada.

Com o intuito de reduzir o impacto do erro de dispersão da RIR, a próxima análise será realizada com uma malha triangular, TWG e para aumentar a representatividade de situações reais, um obstáculo será inserido no recinto.

5.2.2 – Malha Bidimensional TWG

Nesta sessão, o foco da investigação se concentrou na malha TWG com a inserção de um obstáculo. Nesse caso também, aplicou-se o arquivo de áudio com um trecho da música *Sleep Away*, de Bob Acri.

Tal como no caso anterior, este sinal foi utilizado na operação de convolução com as respostas impulsivas e obtidas pelos sensores ou canais *L* (*left*) e *R* (*right*), a partir da simulação da sala indicada na Fig. 5.13, que representa uma sala de 4x6 [m], simulada com a malha do tipo TWG e que foi submetida a uma resposta impulsiva, durante o tempo de 3s, sendo a fonte posicionada no ponto (1,5) e o par receptor, para captar o sinal binaural, situa-se está (3.5, 5) e (3.65, 5), respectivamente. O obstáculo está posicionado na posição 2.7 [m], da coordenada x. Ela apresenta um vão de 1.9 [m] no eixo y, indicado pelo valor 1.9 mostrado na Fig. 5.13.

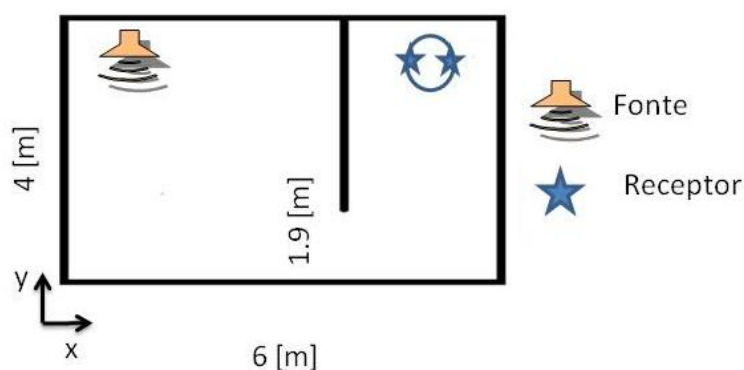


Figura 5.7 – Representação física do ambiente usado para simulação usando TWG.

Como sinal de entrada foi simulada uma meia senóide com frequência de 4096 [Hz], amplitude de 1 [Pa] e tempo de ativação na ordem de 2.44×10^{-4} [s]. A distância entre os nós foi estabelecida como 6×10^{-6} [m], de acordo com a Eq. (4.22), para o sinal de maior frequência, sendo que a velocidade de propagação do meio foi ajustada em 342 [m/s], número de direções da malha ($N=3$) e f_s de 16384 [Hz]. Assim como no caso anterior, os coeficientes de absorção foram variados segundo as bandas de frequência de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 [Hz], durante o tempo de 3 [s]. Os valores de absorção em bandas de frequência são mostrados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Valores hipotéticos dos coeficientes de absorção dos obstáculos.

Frequência em Bandas	Coefficiente de Absorção (%)
125	10
250	15
500	20
1000	30
2000	40
4000	60

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram a geração, propagação e interação da onda com os obstáculos através da malha TWG.

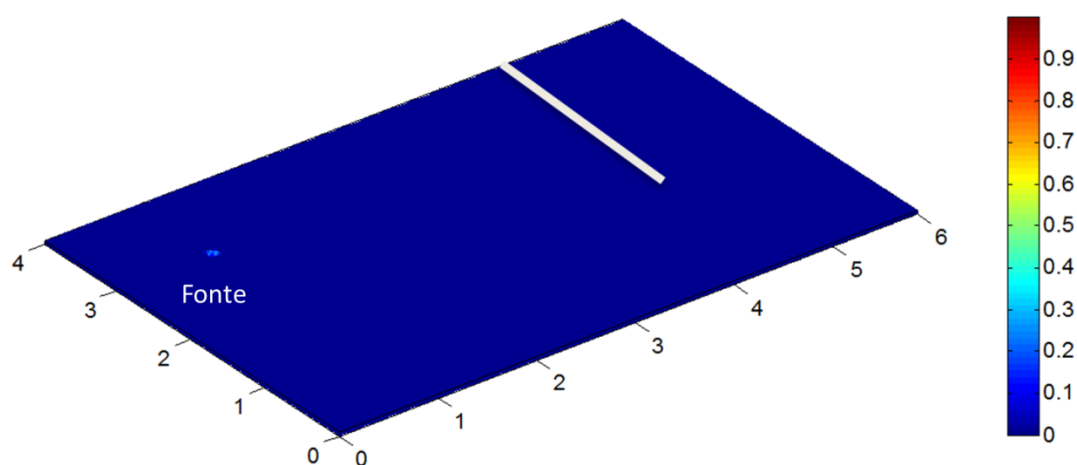


Figura 5.8 – Tempo em que o sistema em repouso é excitado pelo funcionamento da fonte, tempo em que a imagem foi adquirida $t=1.2207e-004s$.

Ainda referindo-se à Figura 5.15 é possível visualizar o momento em que a onda atinge as paredes do recinto:

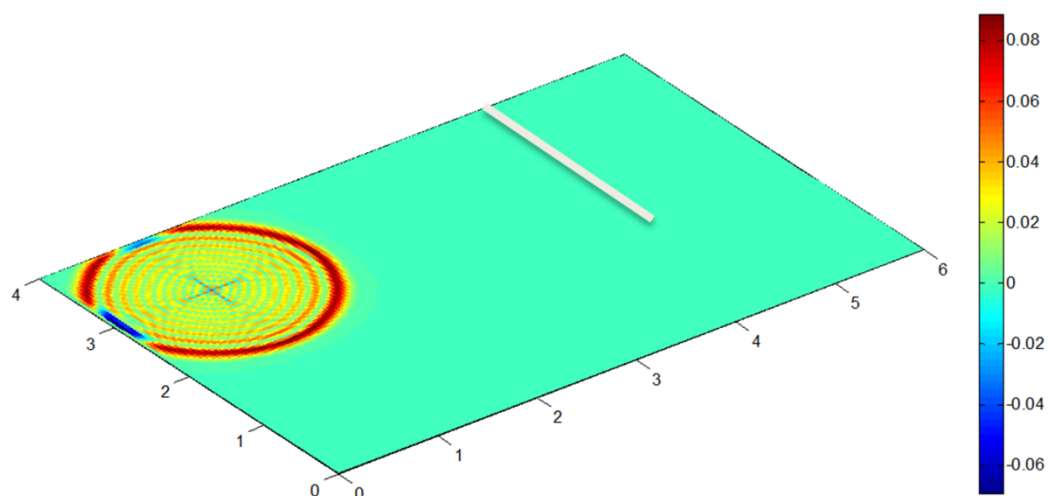


Figura 5.9 – Momento em que a onda atinge os obstáculos, que simulam os casos de paredes. $T=0.0023s$

Na sequência (Fig. 5.16) é possível constatar que devido a presença do obstáculo, as ondas mudam a direção da propagação, que deve contornar o obstáculo.

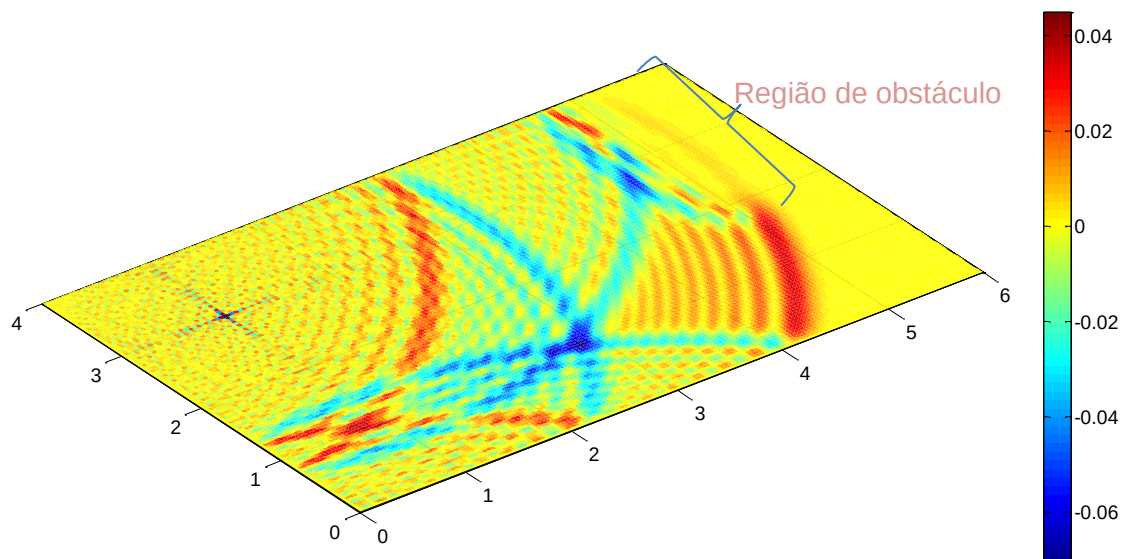


Figura 5.10: Momento em que a onda interage com o obstáculo central da sala, tempo 0.0092s.

Nesse ponto cabe ressaltar a vantagem da DWG em simular barreiras, note que as ondas representadas na imagem conseguem contornar o obstáculo tal como

acontece em casos reais. Esse fenômeno de difração, como já foi explorado ao longo desse trabalho, é uma das grandes limitações das técnicas numéricas baseadas na geometria, como Ray Tracing, por exemplo.

Na sequência, a Figura 5.17 apresenta o momento em que o recinto é tomado pelas ondas sonoras oriundas exclusivamente da reverberação do ambiente

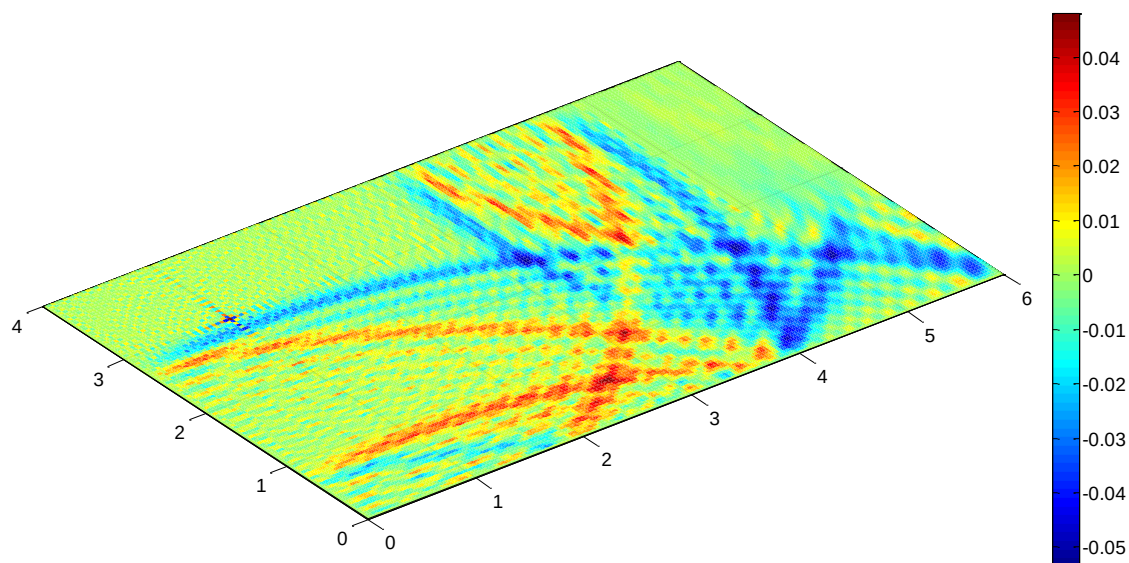


Figura 5.11 – Momento em que o obstáculo é atingido pela energia sonora através das reflexões das ondas, bem como a parcela de energia que foi transmitida através do obstáculo. $t = 0.0122s$

Observe que nesse processo são geradas ondas, que propagam num determinado sentido. Ao coincidir com um obstáculo, a onda muda de fase devido a absorção dos obstáculos e interage com as demais ondas que vem chegando em sentido contrário, recriando o efeito destrutivo da onda.

Com a resposta ao impulso obtida, o próximo passo foi dado em direção a auralização, através de um sinal anecóico convoluído com a composição das BRIR filtradas e o resultado é mostrado na Fig. 5.18, em que aparece o sinal original, o sinal convoluído na posição da fonte e a convolução no ponto receptor.

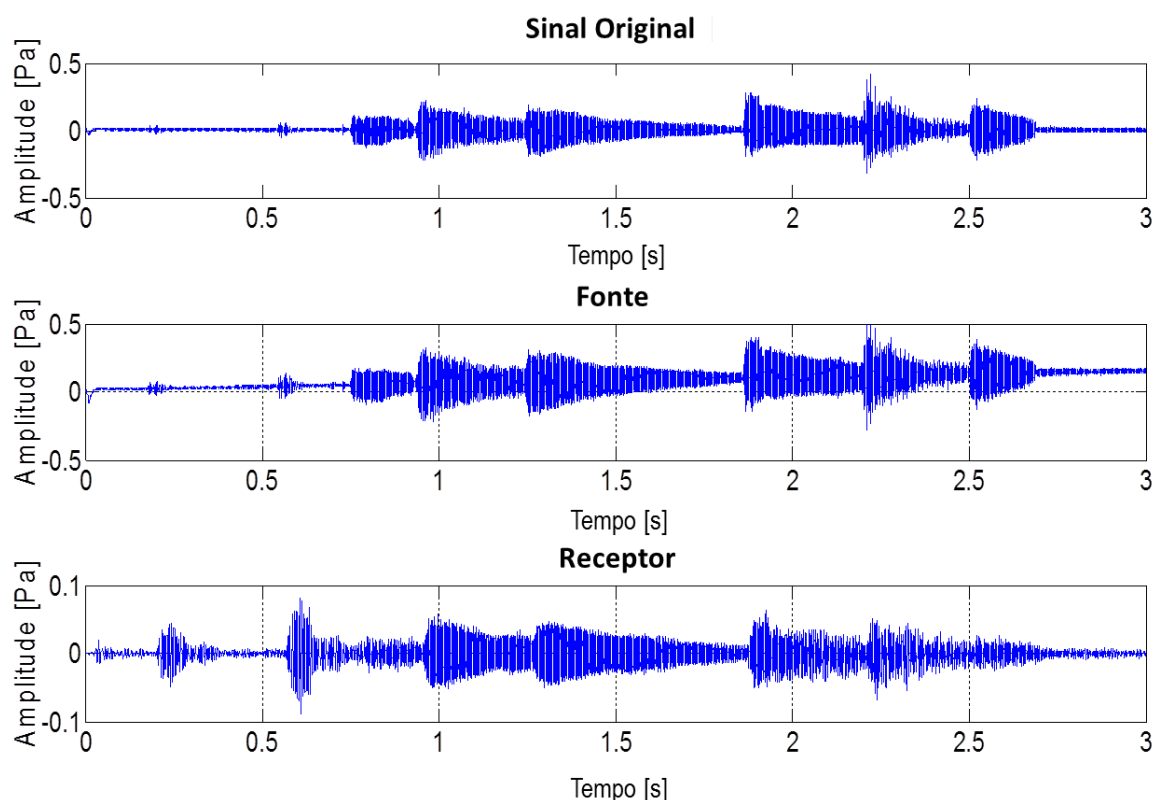


Figura 5.12 – Representação do sinal original, auralizado na posição da fonte e por último auralizado no receptor.

Ao observar os gráficos obtidos na Fig. 5.18 fica muito bem caracterizado a diferença do som auralizado na fonte e no ponto receptor, com relação a amplitude das ondas. No caso da fonte isso ocorre em função da influência direta da energia proveniente da fonte sonora, acarretando numa maior amplitude na fonte do que no receptor.

Assim como no caso anterior, é possível constatar a presença de ruído no sinal, mas segundo literatura sugere, pode ser amenizado aumentando a densidade da malha, ou mesmo trabalhando com tipos diferentes de filtros.

5.2.3 – Malha Tridimensional Tetraédrica

Partindo para o caso tridimensional fez-se a análise da malha do tipo tetraédrica. Também foi aplicado o arquivo de áudio com um trecho da música *Sleep Away*, de Bob Acri e foi utilizado na operação das respostas impulsivas obtidas pelo modelo.

A análise foi simulada num volume de $1 \times 1 \times 1$ [m] submetido a uma resposta impulsiva, durante o tempo de 2s, sendo a fonte posicionada no ponto $(0,1 \times 0,1 \times 0,1)$ e

o par receptor, para captar o sinal binaural, situa-se em $(0,3 \times 0,25 \times 0,17)$ e $(0,45 \times 0,4 \times 0,32)$, representado pela Fig. 5.19. A frequência de atualização de 16384 Hz e a distância entre os nós de 0.0362 m.

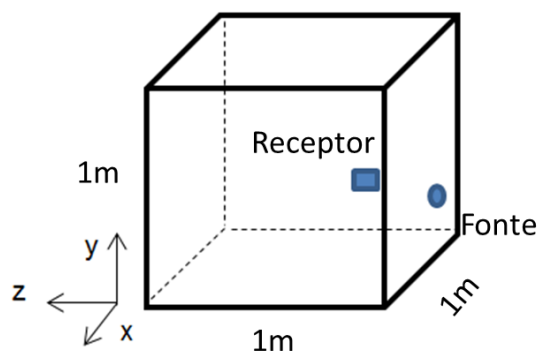


Figura 5.13 – Representação do problema físico tridimensional.

Assim como nos casos anteriores, foram realizadas seis medidas com a variação das bandas de frequência e coeficientes de absorção, de acordo com os valores mostrados na Tab.5.3.

Tabela 5.3. Valores hipotéticos dos coeficientes de absorção dos obstáculos.

Frequência em Bandas	Coefficiente de Absorção (%)
125	5
250	10
500	20
1000	25
2000	35
4000	50

A resposta impulsiva obtida no ponto receptor é mostrada na Fig. 5.20, que mostra o caso particular de uma frequência de 1000 [Hz].

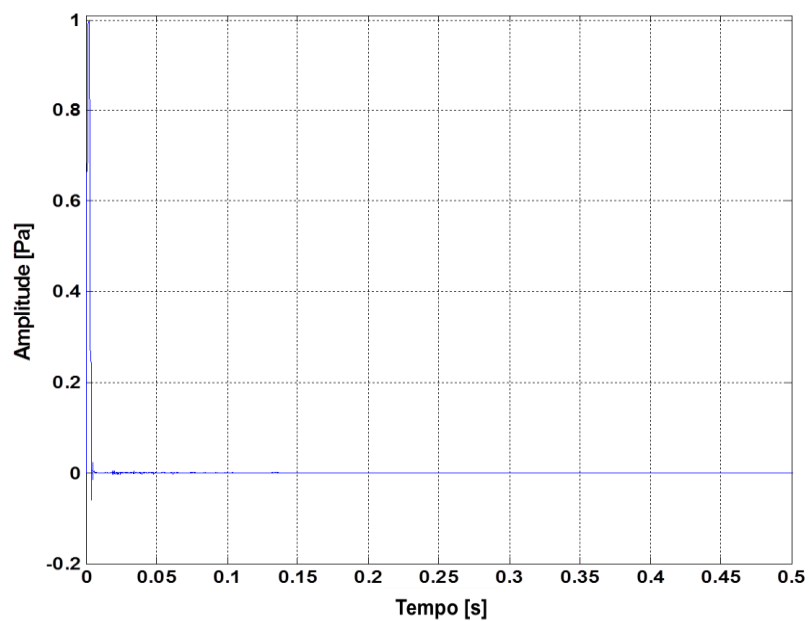


Figura 5.20 – Resposta Impulsiva obtida no ponto da fonte.

No ponto receptor são captados os sinais gerados pela fonte e na Fig. 5.21 é mostrada a composição das seis bandas de frequências.

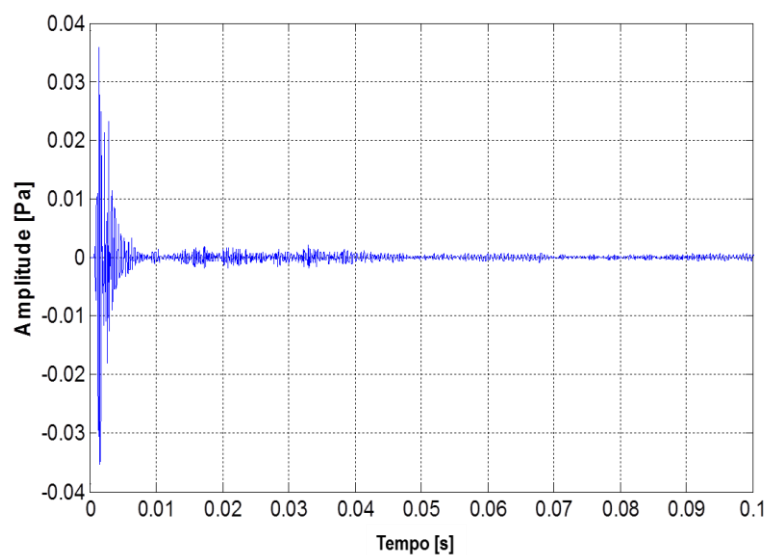


Figura 5.141 – Composição do sinal no receptor

Após passar cada banda num filtro do tipo butterworth de sexta ordem, as componentes filtradas no ponto receptor possui a característica da Fig. 5.22.

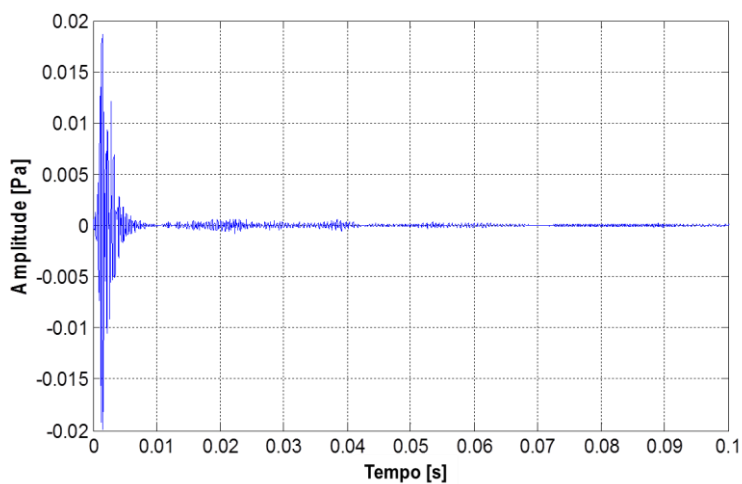


Figura 5.15 – Composição do sinal no receptor filtrado

Assim com para as simulações anteriores, de posse da componente dos sinais filtrados através do filtro Butterworth de sexta ordem, o próximo passo se concentrou na convolução entre o sinal anecóico e das respostas ao impulso da fonte e do ponto receptor, Fig. 5.23:

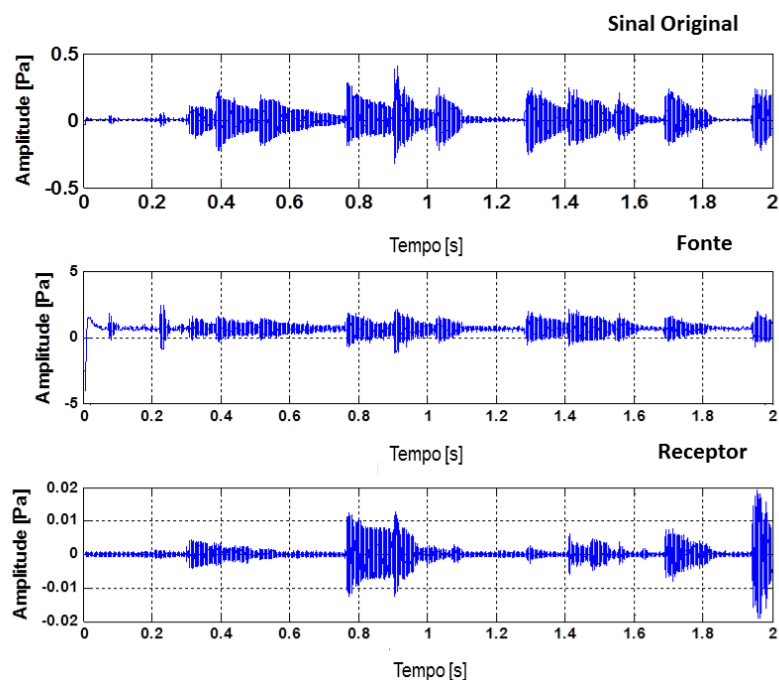


Figura 5.16: Representação do sinal original, auralizado na posição da fonte e por último auralizado no receptor.

Tal como nas análises anteriores, observa-se que as amplitudes nos sinais obtidos na fonte apresentam maior intensidade com relação ao do receptor. Nesse ponto, cabe ressaltar que na região próxima ao segundo segundo, o sinal tende a divergir. Isso pode ser explicado pela característica da malha adotada, (HACIHABIBOGLU; GUNEL; CVETKOVIC, 2010) e (CARVALHO, 2013).

Sabe-se que existem outros fatores além da reverberação, tais como intensidade; impressão espacial e direcionalidade, que representam grande importância na descrição do efeito subjetivo global do som em ambientes fechados. Entretanto, baseado em Vorländer (2007), pode-se afirmar que o parâmetro dominante é a sensação de reverberação e, conseqüentemente, os resultados obtidos podem ser considerados como uma forma de auralização, que foi explorado no trabalho para indicar a aplicabilidade da técnica em função das diferentes geometrias de malhas.

A abordagem ideal seria realizar uma avaliação subjetiva dos diferentes arquivos de áudio obtidos, comparando os resultados simulados com o resultado de uma fonte radiando em uma sala real equivalente ao ambiente simulado. Entretanto, este é um trabalho relativamente complexo que exige um esforço específico e, a participação de um grupo de pessoas suficiente para garantir que os requisitos estatísticos sejam atendidos. Recomenda-se como um trabalho futuro

CAPÍTULO VI

Resultados Experimentais

O procedimento experimental tem como objetivo validar as simulações numéricas, bem como auxiliar nas conclusões deste trabalho. Para as validações foram realizados experimentos num ambiente reverberante e com as configurações do local, foram efetuados os cálculos teóricos e numéricos.

Conforme já discutido ao longo desse trabalho, para se avaliar a qualidade acústica de um ambiente é necessário verificar as características quantitativas e qualitativas do ruído presente. Isso significa calcular as respostas impulsivas associadas aos caminhos compreendidos entre as fontes e os receptores. A análise de resposta impulsiva da sala é gerada para representar a função de resposta da sala ao impulso sonoro.

6.1 – Introdução

Para caracterizar o comportamento acústico de ambientes reverberantes, foi escolhida uma sala de pesquisa situada no segundo andar do Laboratório de Acústica e Vibrações, Bloco 5H da Universidade Federal de Uberlândia e indicada no Apêndice 2, sendo suas características replicadas nas três análises.

6.1.1 – Descrição da Sala de Pesquisa

A princípio foi feito um levantamento das características geométricas do recinto, bem como a análise dos elementos do mesmo. Com dimensões de 4,8 x 4,0 x 2,4 [m], possui uma área de 19,2 [m²] e volume de 46,08 [m³]. Quanto à distribuição

dos materiais que compõem o ambiente, verifica-se que as paredes são do tipo alvenaria pintada, o teto é forrado com uma estrutura de PVC e o chão é coberto de Paviflex®. Além disso, o recinto encontra-se desprovido de mobília, excetuando os instrumentos utilizados para a coleta dos dados, que são descritos com mais detalhes no item sobre o Ensaio Experimental. Os coeficientes de absorção dos obstáculos estão apresentados na Tab. 6.1:

Tabela 6.1: Coeficientes de Absorção (em %) dos materiais da sala de pesquisa com relação às bandas de frequências [Hz], Gerges (2000).

	125	250	500	1000	2000	4000
Bloco pintado	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Tijolo Rebocado e Pintado	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Teto (PVC®) ¹	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Janela de vidro com esquadria de alumínio	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Porta	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,1
Chão (Paviflex®) ¹	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02

Além disso, situam-se numa das paredes duas janelas com dimensões de 1,60 [m] por 1 [m], cada. A porta fica localizada na parede oposta a da janela, com medidas de x=1,95 [m] por 0,9 [m], conforme apresentado na Fig. 6.1.

¹ Em virtude da dificuldade em encontrar o coeficiente de absorção do material que reveste o teto e o chão, os coeficientes de absorção usados foram obtidos no site: <www.sae.edu/reference_material/pages/Coefficient%20Chart.htm>, com data de acesso: 21 de novembro de 2013>.

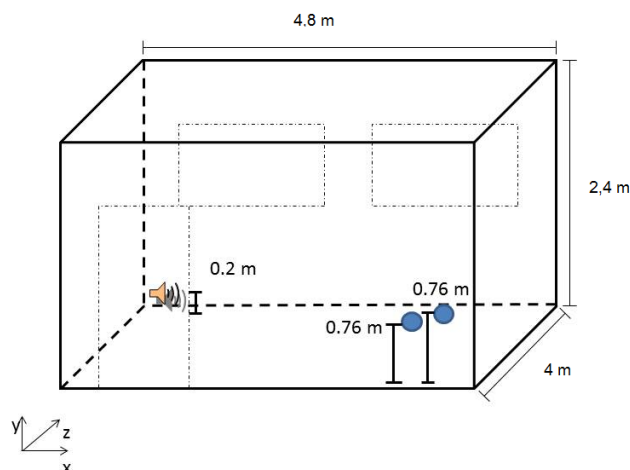


Figura 6.1 – Representação esquemática da sala utilizada para a análise experimental

Com essa configuração em comum para as três análises, o próximo passo se concentrou em realizar os ensaios experimentais e numéricos, bem como efetuar os cálculos teóricos, tal como descrito nas sessões a seguir.

6.2 - Ensaio Experimental

Os equipamentos utilizados para o experimento foram:

- Caixa de som (1);
- Notebooks (2);
- Par de microfones capacitivos B&K Tipo 2669 (3);
- Cabos BNC (4);
- Placa de Aquisição National Instruments BNC-2110;(5)

O esquema da Fig. 6.2 ilustra a configuração do experimento, indicado pelos números que seguem os equipamentos supracitados. Note que o mesmo é composto por duas partes, uma que gera o sinal (excitação) e outra que adquire (Captação da Resposta Impulsiva).

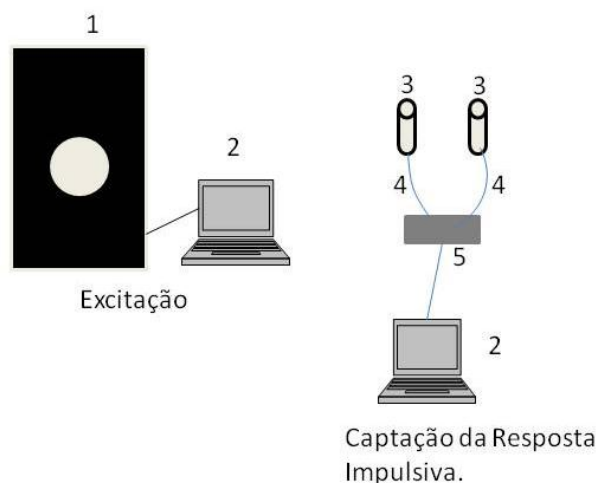


Figura 6.2: Sinal emitido pela fonte no procedimento experimental e virtual.

O notebook foi utilizado para a geração do sinal impulsivo a ser medido. O mesmo foi conectado a uma caixa de som, por meio de um cabo de áudio, para a amplificação do som, sendo a sua potência ajustada para que a amplitude do sinal pudesse ser captada, com o intuito de obter uma melhor precisão do sinal obtido no tempo de reverberação.

No outro ponto da sala, as medições foram captadas pelos pares de microfones, fixados numa estrutura metálica com a intenção de reduzir a interferência de obstáculos no recinto. Os mesmos foram acoplados por meio de cabos BNC, uma placa de aquisição da *National Instruments* BNC-2110, que por sua vez, estava ligada a outro notebook, via cabo USB. Durante cada aquisição o sinal emitido pela fonte se repetiu por 5 vezes, totalizando um tempo de 20 [s] para cada amostra. É importante ressaltar que essas amostras foram feitas para garantir a aquisição do sinal, sendo que apenas um dos sinais de impacto foi realmente analisado.

Após coletado os dados em 2 pontos diferentes da sala (captação binaural), os dados foram tratados, conforme será discutido em detalhes no item a seguir. Os tempos de reverberação também foram calculados teoricamente para a posterior comparação com os valores obtidos experimentalmente, bem como por meio das Malhas de Guias Digitais de Ondas.

Equipamentos e Sistema de Medição Experimental

O sinal sonoro responsável por excitar o sistema trata-se de um meio seno, conforme é possível ver na Fig. 6.3. A amplitude foi ajustada em 1 [Pa], frequência do

signal de 4000 [Hz] e com o tempo de aquisição entre amostras (parâmetro relacionado com a frequência de amostragem) na ordem de $6.25 \cdot 10^{-5}$ [s], durante 4 segundos. Sendo esse sinal o mesmo inserido na sala virtual.

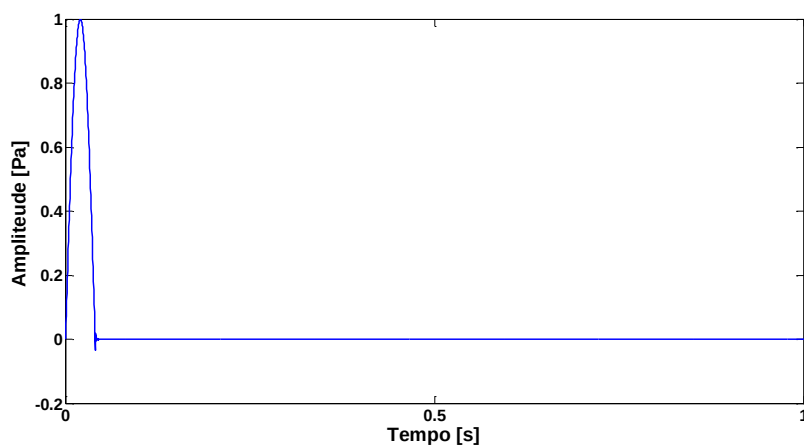


Figura 6.3: Sinal emitido pela fonte no procedimento experimental e virtual.

No procedimento experimental a fonte sonora ainda é caracterizada por uma caixa de som acoplada a um laptop que gera através do Windows Media Player®, o meio seno da Fig. 6.3. Observe que foram propositalmente posicionados no canto da sala, para excitar o maior número de modos acústicos possíveis. O esquema da configuração do procedimento experimental é apresentado na Fig. 6.4.



Figura 6.4 – Representação da fonte utilizada para excitar o sistema experimental, que consiste no notebook executando o meio seno e a caixa de som.

As coordenadas da posição da fonte, assim como os receptores, mais precisamente, dois microfones capacitivos B&K Tipo 2669, estão apresentados na Tab. 6.2.

Tabela 6.2: Representação da Localização espacial da fonte sonora e dos sensores.

	x(m)	y(m)	z(m)
Fonte Sonora	0.20	0.20	0.20
Microfone 1	3.02	0.76	0.63
Microfone 2	3.20	0.76	0.80

Os receptores estão conectados a um sistema de aquisição, conforme ilustra a Fig. 6.5:

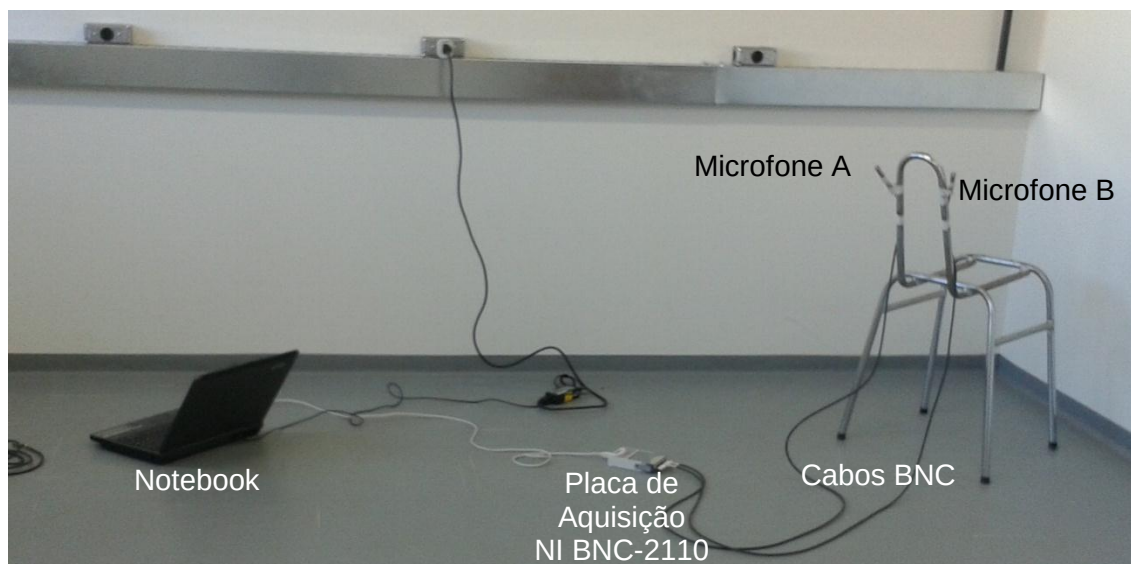


Figura 6.5– Representação do sistema de aquisição de dados que consiste no par de receptores indicados na figura por Microfone A e Microfone B, placa de aquisição NI-BNC-2110 e o notebook.

O sistema de aquisição foi calibrado antes e depois do procedimento de aquisição dos dados.

Obtenção e Tratamento de Dados

Ao total foram realizadas 15 medidas, para cada par de sensores, cujos valores estão apresentado no Apêndice 2. Somado a isso, a cada medida o sinal do impulso foi repetido através do Media Player cinco vezes, totalizando um tempo de aquisição

de cada amostra em 20 [s]. As cinco amostras obtidas em cada uma das 15 medidas foram captadas no intuito de garantir que o sinal fosse obtido. Porém, para a análise da RIR, apenas uma parte do sinal (de quatro [s] e que representa um impacto) foi devidamente analisado.

Outro cuidado tomado foi quanto à escolha do horário de aquisição. Todas as medidas foram realizadas em horário não comercial, pois o tráfego de veículos e circulação de pessoas, dentro do Campus da Universidade e do próprio laboratório, é menor e, conseqüentemente, o nível de pressão sonora associado ao ruído de fundo pouco interfere nas medições acústicas no interior da sala. A Fig. 6.6 apresenta uma das aquisições realizadas pelos sensores A (em azul) e B (em vermelho) no domínio do tempo.

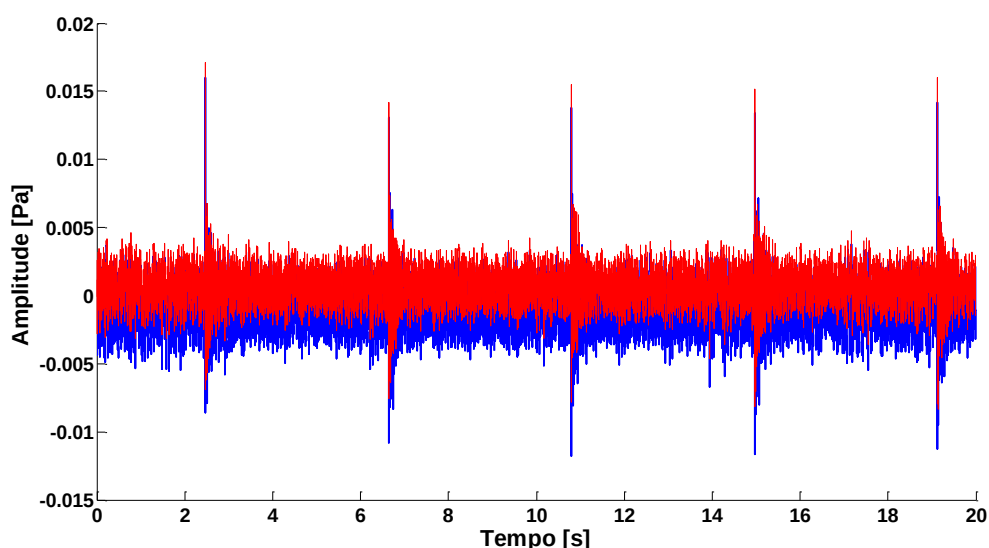


Figura 6.6— Sinal captado nos sensores A em azul e B em vermelho.

Posteriormente, através do Matlab[®] os sinais adquiridos em cada sensor foram filtrados através do filtro *Butterworth* de sexta ordem, gerando um sinal semelhante ao apresentado na Fig. 6.7, na banda de 2000 Hz.

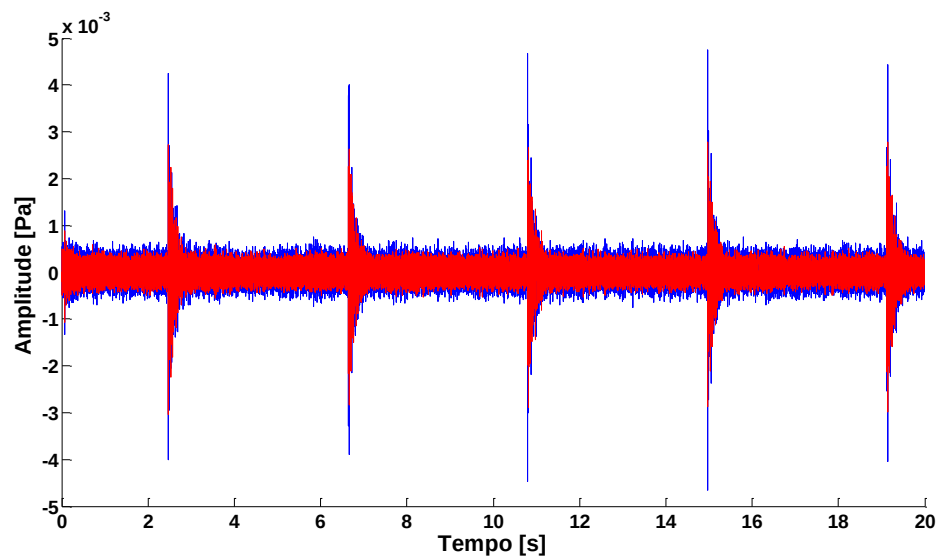


Figura 6.7 – Sinal filtrado através do filtro *Butterworth* de sexta ordem.

Aplicando a Eq.(5.1) para calcular o valor eficaz, onde a variável c_{te} foi calculada com um valor de T de 0,45. Posteriormente, foi feita uma regressão linear num gráfico semelhante a Fig. 6.8 para estimar o TR_{60} .

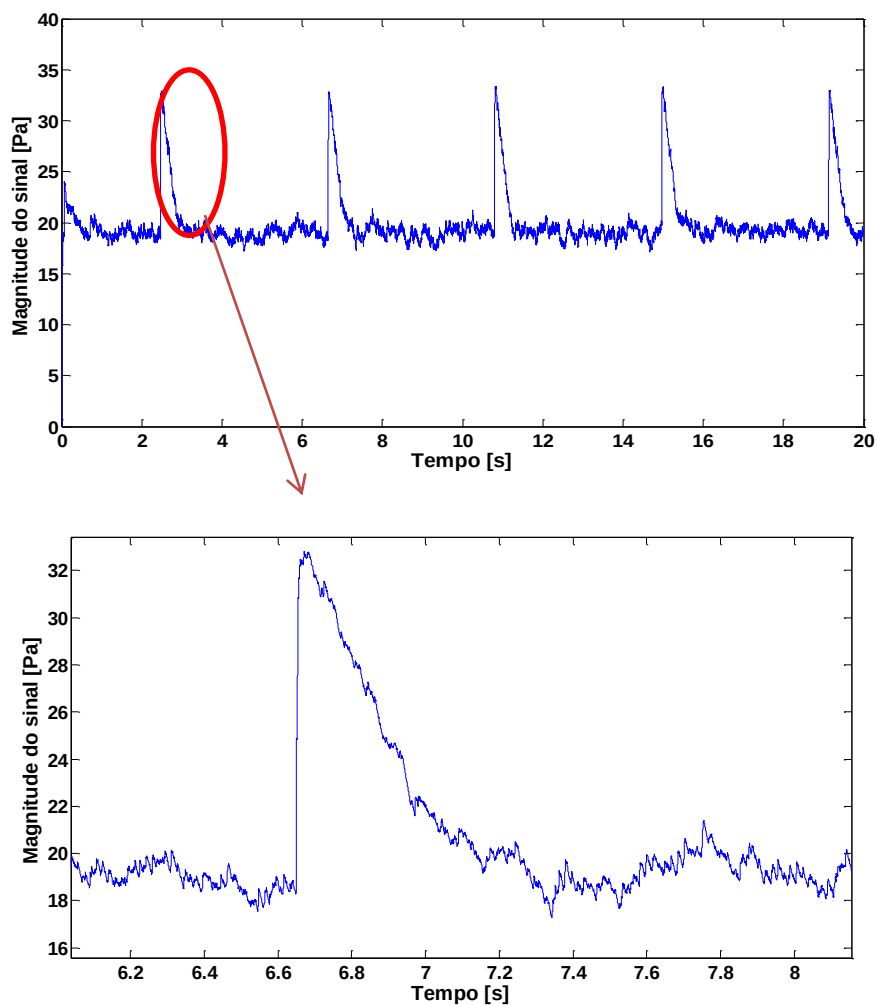


Figura 6.8: Exemplo de um dos sinais obtidos no experimento pelo microfone 1, filtrados em 1000 Hz e em escala logarítmica. O gráfico a direita traz um zoom do pico em destaque.

Esse procedimento foi repetido com todas as amostras dos dois microfones, sendo possível afirmar que, com 95% de confiança, os valores médios em bandas de frequência estão entre os limites superiores e inferiores, apresentados na Tab. 6.3.

Tabela 6.3: Valores com intervalo de confiança de 95% obtidos para obter o TR_{60} para amostras obtidas experimentalmente.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Limite Inferior	1.81 s	1.77 s	1.77 s	1,78 s	1.71 s	1.57 s
Limite Superior	2,01 s	1,94 s	1,98 s	1,91 s	1,89 s	1,72 s

6.3 – Modelo Teórico

Para o modelo teórico, foi calculado o TR_{60} de acordo com a Equação de Sabine, aplicando o volume da sala e as áreas das paredes, teto e chão, pois de acordo de Marros (2012), trata-se de uma equação amplamente utilizada até os dias atuais e que funciona muito bem para ambientes reverberantes com formas regulares, que é o caso dessa análise.

Além disso, foi levando em consideração os coeficientes de absorção contemplados na Tab. 6.1. A partir daí, aplicando esses valores na Equação (2.24), foram obtidos os TR_{60} teóricos, indicado na Tab. 6.4:

Tabela 6.4: Tempo de Reverberação 60 [s] em bandas de frequência [Hz], estimado de acordo com a Equação de Sabine.

125	250	500	1000	2000	4000
1,35	1,56	1,86	1,93	1,85	1,88

Assim como no caso anterior, o TR_{60} também foi expresso em bandas de oitava.

6.4 – Simulação Numérica

Para fazer a análise desse problema, uma sala virtual (representada na Fig. 6.1 e caracterizada por ter as mesmas condições e propriedades da sala real) foi simulada numa malha tridimensional com o arranjo do tipo Cúbico. Para tal, a distância entre os nós foi configurada de acordo com a Eq. (4.53), o tempo de simulação da sala em 4 [s]. O sinal de excitação do sistema foi ajustado com a amplitude de 1 [Pa], porém, diferente do experimental, não foi explorada a diretividade da fonte, uma vez que foi representado uma fonte pontual. O sinal de entrada foi executado por seis vezes, variando o sinal da frequência em bandas de oitava entre 125 e 4K [Hz].

O tempo gasto para executar cada banda de frequência foi variado em virtude da frequência de atualização, distância entre os nós e o passo de atualização do tempo. Afinal são variáveis descritas em função da frequência do sinal senoidal usado para excitar o sistema, tal como discutido no Capítulo 4. O código escrito em C++ foi executado num processador Intel Core I7, memória 16GB e Sistema Operacional de

64 bits. Para as bandas de 125 [Hz], 250 [Hz] e 500 [Hz], foram despendidos menos de 10 [s] cada. Na banda de 1000 [Hz] foram 15 [s], para 2000 [Hz] foram 2:45 [min] e para 4000 Hz aproximadamente 45 min.

A Figura 6.8, mostra o sinal simulado perto da fonte para uma frequência de 4000 [Hz], a distância entre os nós de 0.03 [m], a frequência de atualização em 16000 [Hz] e o passo de tempo em $6.25 \cdot 10^{-5}$ [s]. Nesse caso, o tempo de ativação da fonte foi na ordem de $2.5 \cdot 10^{-4}$ [s], para simular uma aproximação da função Delta de Dirac.

O sinal obtido nos dois pontos receptores é representado pela Fig. 6.9, sendo que em vermelho está representado o sensor A e em azul o sensor B:

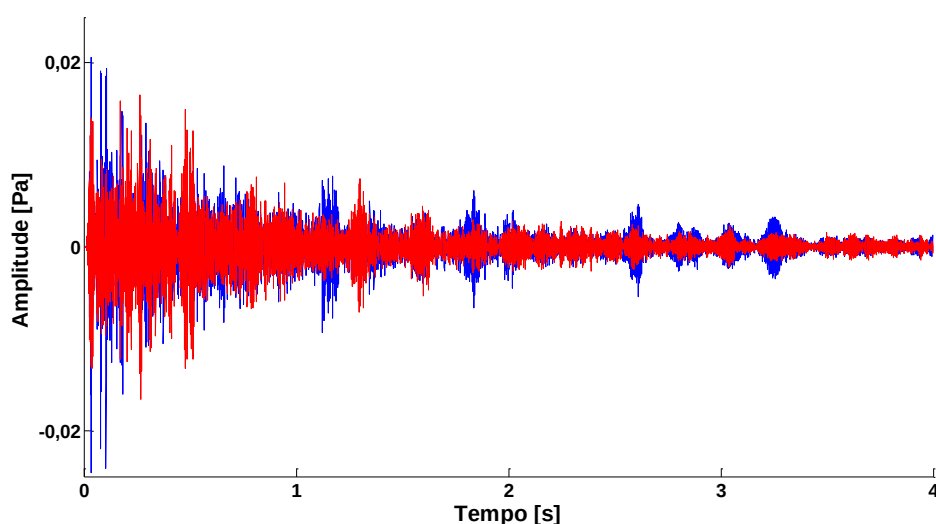


Figura 6.9 – Resposta ao impulso no domínio do tempo nos dois sensores A em vermelho e B em azul. Obtida via técnica de guias digitais de ondas.

Posteriormente, através do Matlab[®] os sinais de cada sensor foram filtrados através do filtro *butterworth* de sexta ordem, gerando um sinal semelhante ao apresentado na Fig. 6.10.

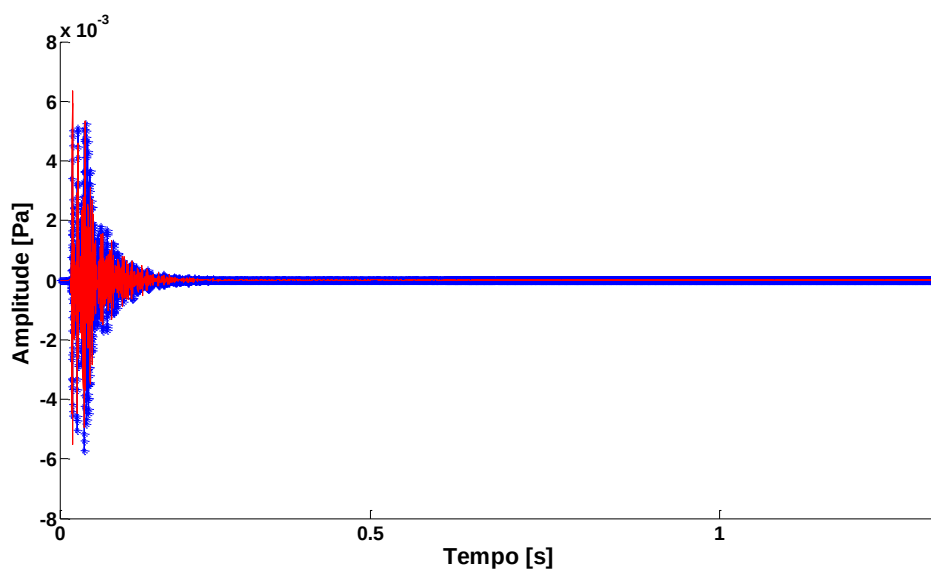


Figura 6.10 – Sinal filtrado através do filtro *butterworth* de sexta ordem.

O próximo passo concentrou-se em calcular o valor eficaz, ou seja, o valor RMS (*Root Mean Square* – Valor Quadrático Médio). Para isso, a média exponencial, $\bar{x}_{RMS}$ é calculada de acordo com a Eq. (6.1). Nesse caso, assim como usado para os valores experimentais, o fator de integração T foi configurado como 0,045 [s], correspondendo a um tempo de integração *impulse*. Os tempos de reverberação obtidos após a regressão linear estão apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Tempo de Reverberação 60 [s] em bandas de frequência [Hz], obtido via técnica de Guias Digitais de Ondas.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
TR_{60}	1,58	1,65	1,71	1,79	1,77	1,64

A próxima sessão se destina a comparar os resultados obtidos através dos três métodos.

6.5 - Análise e comparação dos resultados obtidos via ensaio experimental, modelo teórico e numérico.

Conforme é possível constatar, os valores obtidos nos TR_{60} se mostraram próximos nas três abordagens. De acordo com o apresentado na Tab. 6.5, para o modelo experimental, os tempos de reverberação foram diminuindo com relação ao aumento da frequência. Já para o modelo teórico, o tempo de reverberação maior ficou na frequência de 1000Hz, coincidindo com o caso da simulação numérica.

Tabela 6.5: Compilação dos Tempos de Reverberação 60, expressos em segundos obtidos via métodos: experimental, teórico e numérico, respectivamente.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Limite Inferior Experimental	1.81	1.77	1.77	1,78	1.71	1.57
Limite Superior Experimental	2,01	1,94	1,98	1,91	1,89	1,72
Teórico	1,35	1,55	1,86	1,93	1,85	1,88
DWG	1,58	1,65	1,71	1,79	1,77	1,64

Nesse ponto, é importante destacar que os valores obtidos se apresentaram dentro do esperado. A diferença entre os modelos numéricos e teóricos com relação aos medidos pode ser explicada pelos valores adotados como entrada do sistema e que conforme destacado na descrição dos itens da Tabela 6.1, tais valores foram obtidos da literatura. Para computar o Tempo de Reverberação do recinto, o ideal é estimar *in situ*, através dos cálculos dos coeficientes de absorção dos materiais, atividade que foge do escopo desse trabalho, se caracterizando como sugestão para trabalhos futuros.

De posse desses resultados e com o intuito de aferir a aplicabilidade da técnica de DWG, foram calculados alguns quesitos da qualidade de salas acústicas. Faz-se necessário ressaltar que o objetivo desse trabalho é propor um método para medir o comportamento acústico de salas com custo computacional baixo e boa precisão, pautado na qualidade sonora do recinto analisado, bem como a auralização, que são desdobramentos possíveis de serem obtidos a partir dessa modelagem.

O primeiro parâmetro estimado foi o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) e para isso foi realizada a regressão linear no gráfico, assim como feito para calcular TR_{60} , para estimar o tempo necessário para decair 10 dB. A Tab.6.6 apresenta os valores EDT obtidos.

Tabela 6.6: EDT [s] obtidos via técnica de Guias Digitais de Ondas

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
EDT (DWG)	0,84	0,89	0,8	0,82	0,8	0,7

Quanto ao quesito de vivacidade, é possível constatar que, de acordo com os valores apresentados na Tabela 6.5, é possível afirmar que se trata de uma sala viva para as três análises. Apenas para as frequências de 125 [Hz] e 250 [Hz] da análise teórica e para a frequência de 125 [Hz] da Malha de Guias Digitais de Ondas encontrou-se indícios de que o TR_{60} poderia ser menor do que 1,6 [s], características de um ambiente seco.

Para o parâmetro Calor ou Razão (BR), a Eq. 2.26 foi aplicada, encontrando os respectivos valores na ordem de 0,91 e 0,92, para os limites inferiores e superiores do TR_{60} obtido experimentalmente. Para os valores obtidos numericamente e via DWG, foram obtidos os valores: 0,76 e 0,92. Beranek (1996) indica, para salas com tempo de reverberação abaixo de 1,8 s, valores ideais de BR variando entre 1,1 e 1,5. Observando os dados calculados, percebe-se que os valores obtidos para o parâmetro BR estão fora desta mesma faixa. Isso implica que de acordo com a análise essa sala não apresentaria tempo de reverberação mais curto nas baixas frequências quando comparado ao tempo e reverberação nas médias frequências.

Por fim, o parâmetro Brilho (Br) foi calculado pela Eq. (2.29), encontrando valores de 0,97 e 0,98, para os limites inferiores e superiores do TR_{60} experimental, respectivamente. O valor de 0,98 foi calculado para as análises teóricas e DWG. Recomenda-se, de acordo com Everest (2001), que os valores ótimos para o parâmetro Br sejam os mais altos possíveis, e estejam acima de 0,8. Tomando como base esta referência, observa-se que os valores estão entre 0,97 a 0,98, ou seja que a sala apresenta um valor bom para o brilho.

CAPÍTULO VII

Conclusão e Trabalhos Futuros

Quando se fala em reprodução sonora, o ambiente exerce um papel importante no resultado final, ou seja, interfere na qualidade com que o som será percebido pelos ouvintes dentro do recinto. Assim, fazer a caracterização adequada para um futuro tratamento tornam-se atividades corriqueiras para os profissionais do ramo, mas não necessariamente, triviais. Partindo desse problema, essa tese se propôs a investigar a viabilidade em utilizar as Malhas de Guias Digitais de Ondas como técnica preview para a construção de salas acústicas e para isso estima a Resposta Impulsiva bem como realiza a Auralização Inteiramente Computacional de recintos virtuais.

Durante a realização desse trabalho, constatou-se que com o uso dessa técnica foi possível prever e auralizar o comportamento do som dentro de um determinado recinto através da inserção de parâmetros, tais como, características geométricas das salas e materiais que os compõem, bem como o posicionamento de fontes, obstáculos (como apresentado na Fig.5.12) e sensores. Uma das vantagens dessa abordagem é que os dados de entrada podem ser modificados e o código poderá ser novamente executado, verificando as mudanças que essas novas entradas impõem no processo sem grandes custos financeiros quando comparado aos modelos em escala, ou de processamento, quando comparado ao modelo de Elementos Finitos, por exemplo.

Vale ressaltar que diferentemente dos métodos numéricos tradicionais, os conceitos utilizados no desenvolvimento do método DWG foram concebidos diretamente da solução unidimensional da onda, relacionando o tempo e o espaço. Em outras palavras, os resultados foram processados através da manipulação de equações, sem recorrer à discretização da equação diferencial da onda. Porém vale

ressaltar que o método fundamenta-se nos mesmos princípios físicos da natureza que os métodos que partem da equação da onda. Conforme apresentado no Capítulo 5, para simular uma sala bidimensional a técnica de DWG o tempo gasto para obter a RIR foi de oito minutos enquanto para a técnica de Elementos Finitos foi dispendido quase uma hora.

Outro fator que exerceu grande impacto no tempo de processamento foi à escolha da linguagem de programação. Inicialmente, adotou-se o Matlab® para obter a RIR do ambiente, porém quando a análise se concentrou no modelo tridimensional ficou inviável a adoção do programa, uma vez que os tempos de execução se estendiam por mais de 24 horas. Ao migrar para a linguagem C, o custo computacional para a simulação do mesmo problema diminuiu para aproximadamente 1 hora, conforme discutido no Capítulo 5.

Outra grande vantagem apresentada pela técnica está na capacidade de representar os fenômenos associados à propagação de uma onda esférica, tais como, reflexão, difração e difusão – diferentemente dos métodos geométricos, tradicionalmente utilizada em acústica de ambientes. Além disso, com o auxílio de ferramentas gráficas computacionais, é possível visualizar o fenômeno de propagação, isso é possível pelo fato de ser um método que se processa no domínio do tempo, demonstrando sua grande utilidade didática.

Durante a comparação entre os métodos numérico, teórico e experimental os resultados encontrados foram aproximados, apresentando um tempo de reverberação relativamente alto para uma sala de pequenas dimensões, mas justificável pela falta de mobília dentro do mesmo. Além disso, os TR60 dos valores teóricos e simulados apresentaram um perfil mais semelhante, fator que condiz com o fato de serem adotados os mesmos parâmetros de entrada para os dois casos. Como uma proposta de melhora na concordância entre os valores teóricos e simulados com relação ao experimental, sugere-se a estimação dos coeficientes de absorção *em situ*, caracterizando sugestão para trabalhos futuros.

Além disso, apresentando a aplicabilidade da técnica, foi possível constatar que com os Tempos de Reverberação estimados, é possível que ainda na fase do projeto da sala, seja possível aferir a qualidade acústica da mesma. Para isso, com simulações em que são realizados ajustes de materiais que compõem o ambiente é possível que o projetista consiga conceber ambientes previamente otimizados, apresentando qualidade acústica para o fim a qual se destina.

Tão importante quanto os resultados numéricos, são as soluções capazes de produzir resultados audíveis para uma fonte sonora radiando dentro de um recinto arbitrário. Em função disso, buscou-se a apresentação do sinal sintetizado pelo método DWG para os diferentes arranjos de malhas. Assim, através da convolução da resposta impulsiva simulada pelas malhas em dois pontos (BRIR) com sinal anecóico de uma fonte arbitrária, obteve-se um arquivo de áudio estéreo. Esse sinal sonoro resultante representando como seria a recepção do sinal anecóico reproduzido no recinto virtual.

Ao longo deste trabalho, demonstrou-se claramente a viabilidade de implementação computacional e aplicação do método DWG para modelagem de salas acústicas. A cada etapa da construção dos resultados para simulações de diferentes problemas acústicos os mesmos foram validados com referência a outro modelo numérico, posteriormente o teórico e experimental.

Durante o seu desenvolvimento, foram constatadas as virtudes computacionais (tempo de processamento e espectro obtido) do método, principalmente no que tange a análise e projeto acústico de ambientes, que poderão ser aplicados em recintos tais como salas de estudo; música; e até mesmo a possibilidade de simulação de ambientes maiores, como teatros e cinemas, com o uso de um computador dedicado, obviamente. Conclui-se, portanto, que o método numérico DWG pode ser explorado como uma ferramenta robusta de pesquisa, projeto e desenvolvimento em diversos casos relacionados à acústica de salas, incluindo a síntese sonora.

7.1 – Trabalhos Futuros

Durante a realização desse trabalho, vislumbrou-se a aplicação de um método eficiente que pudesse de ser aplicado em projetos de salas acústica, a malha de Guias Digitais de Ondas. O presente trabalho não tem a pretensão de esgotar o tema proposto, mas sim, iniciar uma investigação a respeito da técnica de DWG como técnica provisional para acústica de salas e conseqüentemente, ainda necessita desenvolver-se em muitos aspectos. A fim de ampliar os conhecimentos a respeito do assunto, complementando os resultados aqui obtidos, propõem-se o desenvolvimento dos seguintes assuntos:

- Estudo e modelagem de fontes sonoras incluindo sua geometria e direcionalidade;
- Proposta da construção de uma nova malha cuja distância inter-nodal seja híbrida, ou seja, apenas nos pontos de interesse de análise, como na fonte e no receptor, haveria uma densidade de pontos maior. Para a região fora de interesse, as juntas de dispersão poderiam ficar mais espaçadas, aumentando o poder computacional da técnica;
- Uso de um pré-processador, tal como o programa *Hypermesh*® para a elaboração de malhas. Sendo que a ferramenta para criação de interfaces gráficas para geração de malhas leve em consideração os critérios de arranjo e propagação inerentes aos diferentes tipos de malhas já desenvolvidos para o método. Assim, o algoritmo ficaria a cargo apenas de calcular as pressões sonoras em cada ponto, sem consumir tempo em montar o arranjo de cada nó na malha;
- Comparação mais aprofundada do método DWG com outros métodos numéricos aplicados à acústica, como os métodos baseados na geometria, estabelecendo com clareza e elevado grau de especificidade as diferenças e os pontos em comum;
- Inclusão do modelo biaural através das respostas impulsivas da cabeça, também denominadas de HRIR (*Head Related Impulse Response*) do receptor;
- Realizar uma avaliação subjetiva dos diferentes arquivos de áudio obtidos pelos processos de auralização.
- Ampliar o número de quesitos de avaliações da qualidade acústica em diferentes situações, avaliando espaços maiores como auditórios e preenchidos;
- Utilização de técnicas mais eficientes no processamento digital de sinais e síntese sonora;

- Cálculo dos coeficientes de absorção in situ para servirem de entrada para o modelo numérico de Malhas de Guias Digitais de Ondas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AHNERT, W.; SCHIMITD, W. **Fundamentals to perform acoustical measurements.** Appendix to EASERA, 2005.
- ANDO, Y. **Concert Hall Acoustics.** Springer-Verlag: Berlin, Vol.01 1985.
- ANDRADE, S. M. **Metodologia para Avaliação de Impacto Ambiental Sonoro da Construção Civil no Meio Urbano.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2004
- ANDRADE, S.; SLAMA, J.; AZEVEDO, J. **Metodologia para Avaliação de Impacto Ambiental Sonoro na Construção Civil no Meio Urbano.** Acústica Guimarães Portugal, Id 002-p1. 2004.
- AWARD. H, et. al. **Architectural acoustics in education facilities: An empirical study on university classromms in Egypt.** Proceeding of meetings on acoustics, v.18. 2012.
- BARRET, L. C.; WYLIE, C. **Advanced Enginerring Mathematics.** Mc GrawHill. 1995. Vol.01.
- BARRON, M. **The Subjetive Effects of the first Reflection in Concert Halls - The Need for Lateral Reflections.** Journal Sound Vib. v. 15, p. 475-497. 1971.
- BASTOS, L.. **Qualidade Acústica de Auditórios.** Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil: Universidade de Aveiro. 2010

- BEENSON, M.; MOORE, A.; MURPHY, D.; SHELLEY, A. e. **Renderair-room acoustics simulation using a hybrid digital waveguide mesh approach**. Proc. of the AES 124th Convention: New Horizons in Audio, Amsterdam, 2008.
- BENDAT, J. S.; PIERSON, A. G. **Random data analysis and measurement procedures**. Measurement Science and Technology, v. 11, n. 12, p. 1825, 2000.
- BERANEK, L. L. **Concert & Opera Hall: How they sound**. The Journal of the **Acoustical** Society of America, v.99, n.5, p 2637-2637, 1996.
- BERANEK, L. L.; MELLOW, T. **Acoustics: Sound Fields and Transducers**. Academic Press, Vol.01, 2012.
- BERDAHL, E.; NIEMEYER, G.; SMITH III, J. **Using haptic devices to interface directly with digital waveguide-based musical instruments**. IN. PROCEEDINGS OF THE NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW INTERFACES FOR MUSICAL EXPRESSION, Pittsburg, PA. p.183-186, 2009
- BILBAO, S., **Wave and scattering methods fot the numerical integration of partial differential equations..** PHD Thesis. University of Stanford, 2001
- BISTAFÁ, R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. Edgard Blucher, São Paulo, 2006.
- BLACKSTOCK, D. **Fundamentals of Physical Acoustics**, J.Wiley, 2000.
- BLAURETE, J. **Spatial Hearing - The Psychoacoustics of Human Sound Localization**. 2ed. The MIT Press. 1997.
- BOAVENTURA, A. P. V. **Modelagem computacional da propagação sonora multifrequencial através da malha de guias digitais de ondas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009

- BOREN, B. B. **Acoustic simulation of renaissance Venetian churches**. The Journal of the Acoustical Society of America. v.130, p. 2318-2318, 2011.
- BOS, L.; EMBRECHTS, J.J., **An interactive real-time based auraliation system for room acoustics implementing directinoal impulse response and multiple audio reproduction modules for spatializations** (The AURALIAS project). PROC. IN NAG DAG, 2009, p. 1459-1462, 2009.
- BRIGGS, A.; OLEG, K. **Acoustic microscopy**. Oxford University Press, 2009.
- BUETTNER, C. **Survey on the acoustical of early concert venues for western classical music in Japan**. In Virtual Systems and Multimedia, 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON IEEE, p.353-356, 2010.
- BURATTI, C.; MORETTI, E.; VERGONI, M. **The acoustic performance of Cucinelli's theatre: from the design to the test measurement session**. THE 38TH INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, Ottawa, Canadá, p.23-26, 2009.
- CAMILO, T. S.; TENEMBAUM, R.; COELHO, J. **Engenharia acústica auxiliada por computador: um método híbrido para simulação de acústica de salas**. UFMG: SEMEA (SEMINÁRIO DE ENGENHARIA E ÁUDIO). 2002.
- CAMPOS, G. **Three-Dimensional Digital Waveguide Mesh Modelling for Acoustic Simulation**, PHD Tesis Eletronic, N.York, 2003
- CAMPOS, G. **Modelação Acústica 3D por Malhas de Guias de Ondas Digitais**. Associação Portuguesa de Engenharia de Áudio, 2006.
- CAMPOS, G.; HOWARD, D. **A parallel 3D digital waveguide mesh model with tetrahedral topology for room acoustic simulation**. IN. PROCEEDINGS OF THE COST G-6 CONFERENCE ON DIGITAL AUDIO EFFECTS (DAFX), Verona, Italy, p.73-78, 2000.

- CARVALHO, R. **Modelo Físico de Huygens na Solução Discretizada de Campos Acústicos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- CHANDAK, A.; ANTANI, L.; MANOCHA, D. **Efficient auralization for moving sources and receiver**. Technical Repost, TR11-008: University of North Carolina at Chapel Hill, 127-137, 2011
- CHENG, C.; WAKEFIELD, G. **Introduction to head-related transfer functions (HRTFs): Representations of HRTFs in time, frequency and space**. J.Audio Eng. Soc: 49(4), p. 231-249, 2001
- CHIQUITO, S.; RAMOS, A. **Batimentos e Ressonância de diapasões analisados usando um osciloscópio**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.27 n.2, 27(2), 219-223, 2005.
- DIAS, R. M. **Análise Comparativa dos Métodos Normalizados de Previsão de Transmissão Sonora por Via Aérea**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009..
- EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. New York, McGraw-Hill, , p.200, 1988.
- ELORZA, D. O. **Room acoustic modelling using the ray-tracing method: implementation and evaluation**. PHD Thesis, p.116, 2005.
- ERKUT, C.; MATTI, K. **Finite Difference Method Vs. Digital Waveguide Method In String Instrument Modeling And Synthesis**. Journal of the Acoustic Society of America, pp. 1681-1691, 2002.
- ETTER, P. C. . **Underwater Acoustic Modeling and Simulation**. CRC Presl Llc, Vol.01 2013.
- EVANGELISTA, G.; ECKEHOLM, F. **Player-Instrument Interaction Model for Digital Waveguide Synthesis of Guitar: Touch and Collusions**. Audio, Speech and Language Processing, IEEE Transaction, v18, n.4: p822-832, 2010.

- FAN et al. **Optimization of non-local impedance parameters of viscoelastic materials**. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, v.38 p. 268-272, 2012.
- FARIA, R. **Auralização de ambientes audiovisuais imersivos**. São Paulo - SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- FARINA, A. **Ramsete, a new pyramid tracer for medium and large scale acoustic problems**. Proc. of Euro Noise, Vol.95. 1995.
- FARINA, A. **Impulse Response Measurements**. Bolkesjo Tourist Hotel: 23RD NORDIC SOUND SYMPOSIUM - Training and Information Seminar for Audio People, 2007.
- FERNANDES J. A. C. **Auralização: técnicas de modelagem e simulação binaural de ambientes acústicos virtuais**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005
- FIGUEIREDO, F. L. **Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música**, Dissertação de mestrado. Escola de Comunicação e Artes da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- FIGUEIREDO, F.; IAZZETTA, F. **Parâmetros Acústicos em Salas de Música: análise de resultados e novas interpretações**. Anais do Quarto Congresso de Engenharia de Áudio. São Paulo: Audio Engineering Society - Seção Brasil, v.1, p-66-71, 2006.
- FONTANA, F. **Multidimensional Wave Propagation using the Digital Waveguide Mesh**, Centro di Sonologia Computazionale, Università degli Studi di Verona, Verona, Itália, 2002.
- FONTANA, F.; ROCCHESSE, D. **A New Formulation of the 2D-Waveguide Mesh for Percussion Instruments**, Centro di Sonologia Computazionale, Univesità degli Studi di Verona, Verona, Italia, 1995.

- FORSTER, M. **Auralization in Room Acoustics**, Graz: Graz University of Technology, 2008.
- FREENSTON, D. **Dynamic control of a 2-D waveguide model of the vocal tract**, Skolna for datavetenskap och Kommunikation Kungliga Tekniska: Hogskolan, 2009.
- GERGES, S. N. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: NR Editora. 2000.
- GOMES, M. H., BERTOLI, S., DEDECCA, J. **Implementação de métodos para a simulação acústica e auralização de salas**, *SOBRAC*, p.12-25, 2007
- GRANIER, E., KLEINER, M., DALENBACK, B. **Experimental auralization of a car audio installations**, *J. Audio Eng. Soc.* 44(10), p.25-28, 1996.
- GUEDES, R. C. **Projeto e construção de uma câmara reverberante em escala reduzida para caracterização acústica de materiais absorventes**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará (UFPA). Belem, 2007
- GUY-BART, S.; EMBRECHTS J.J. A. D. **Comparision of different impulse response measurement techniques**. *JAES*, v. 50, Issue 4, p. 249-262, April, 2002.
- HACIHABIBOGLU, H.; GUNEL, B.; CVETKOVIC, Z. **Simulation of directional microphones in digital waveguide mesh-based models of room acoustics**. *Audio, Speech, and Language Processing*, *IEEE Transaction*, v.18, n.2, p.213-223, 2010.
- HANSEN, C. H. **Active control of noise and vibration**. CRC Press Llc, 2013.
- HODGSON. **On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms**. *J. Acoustic Soc. America*, v.88 (2), August, p.871-877, 1990.
- HODGSON, M. **Experimental Evaluation of Simplified models for Predicting Noise levels in Industrial Workrooms**. *J. Acoustic Soc. Am.*, v. 103, n.4 April, p. 1933-1939, 1998.

HUOPANIEMI, J. **Virtual Acoustics and 3-D Sound in Multimedia Signal Processing.**, Doctoral thesis, Helsinki University of Technology, 1999

IAZZETA, F.; FIGUEIREDO, F.; MASIERO, B. **Parâmetros subjetivos em salas destinadas à prática musical.** PROC. IN CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ACÚSTICA. 2004, p. 1-8., 2005

ISO 3382-1, **Acoustics Measurement to Room Acoustic Parameters. Part 1: Performance Spaces**, 2009

JAMES, et al. **Advanced Modern Engineering Mathematics.** Harlow: Pearson Education Ltd, 1999

KAMINSINSKI, T. **Acoustic Simulation and experimental studies of theaters and concert halls.** Acta Physica Polonia A, v. 118, n.1 p.78-82, 2010.

KINSLEY, L.; AUSTIN, R. F.; ALAN, B.; JAMES, V. **Fundamentals of Acoustics**, 3 ed.. USA: J.Wiley, 1999.

KLEINER, M. A. Auralization - An Overview. **J. Audio Eng. Soc.** v.41, n.11, p. 861-876, nov. 1993.

KUTTRUF. Auralization of impulse responses modeled on the basis of raytracing results. **J. Audio Eng. Soc.**, v.41(11), p.876–880, 1993.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics.** Spon Press (UK), 2000.

LOKKI, T. **Physically-base Auralization - Design, Implementation and Evaluation.** Espoo, 2002, Dissertation for the degree of doctor of science in Technology - Finland.

LOKKI, T. **Diffuse and Intensity Analysis of Spatial Impulse Responses**, Acoustics v.8, p. 6495-6500, Jun. 2008.

- LOKKI, et al. **Creating Interactive Virtual Auditory Environments**. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 49-57. 2002.
- LOKKI, T.; JUKKA, P. **Applying anechoic recordings in auralization**. PROC. OF THE EAA SYMPOSIUM ON AURALIZATION, p. 15-17 June. Espo, Finland, 2009.
- LOKKI, T.; SAVIOJA, L. **Evaluation of Auralization Results**. ForumAcusticum, 2005.
- MALISKA, C. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. (S. Edição, Ed.) LTC, 2004.
- MANNIS, J. A. **Intérprete do som: bases interdisciplinares da performance eletroacústica - tomada e projeção do som**. Belo Horizonte, MG: SemEA - Primeiro Seminário Brasileiro de Engenharia de Áudio, 2008.
- MARKEL, J.; GRAY, A. **Linear Prediction of Speech**. New York: Springer-Verlag, 1976.
- MARROS, F. **Caracterização acústica de salas para prática e ensino musical**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.
- MARTIN, J. M, **Binaural simulation of concert halls a new approach for the binaural reverberation process**. J. Acoustic, V. 94, p.3255, 1993.
- MARTIN, J.; VIAN, J. **Binaural sound simulation of concert halls by a beam tracing method**. Proc. 13th. CONGRESS OF ACOUSITC (ICA), Belgrade, Yugoslavia, 1989
- MASIERO, B. **Estudo e Implementação de métodos de medição de resposta impulsiva em salas de pequeno porte**. São Paulo: Laboratório de Acústica Musical e Informática - ECA USP, 2004.

- MASIERO, B. S.; IAZZETTA, F. **Estudo e Implementação de métodos de medição de resposta impulsiva.** p.200-208, 2005.
- MELO, V. S. ET AL. **Aperfeiçoamento do software RAIOS para simulação numérica de acústica de salas com inclusão de modelo modal para baixas frequências.** Acústica e Vibrações, V. 38, 2007.
- MIGNOT, R.; HELIE, T.; MATIGNON, D. **Digital waveguide modeling for wind instruments: build a state-space representatio based on the Webster-Lokshun Model.** IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing, vol.18, n.4, p.843-854, 2010.
- MOONEY, J. **Psychoacoustic limitations of discrete infinite impulse response and finite impulse response auralizations.** The Journal of the Acoustical Society of America, v.129, p.2390, 2011.
- MOORER, J. **About this Reverberation Business.** Computer Music Journal, Computer Music Journal, v.3(2), p.13-27, 1979.
- MORAES, D. D. **Medição e Previsão Numérica do comportamento acústico de um teatro experimental para a UFPA,** Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Pará. Belém – PA, 2007,
- MOURA, H. G. **Simulação da Propagação de Ondas Acústicas Através de uma Malha de Guias Digitais de Ondas,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlandia, MG, Brasil, 2005.
- MURPHY, D. E. **Acoustic modeling using the digital waveguide mesh.** Signal processing Magazine, IEEE , v.24(2), p.55-66, 2007.
- MURPHY, D. S. **Diffusing boudaries in the digital waveguide and their effect on reverberation time.** In. Commnications, Control and Signal Processing, ISCCSP, 3rd. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IEEE, p.1498-1503, 2008.

- MURPHY, D.; MULLEN, J. **Digital Waveguide Mesh Modelling of Room Acoustics: Improved Anechoic Boundaries**. PROC. OF THE 5 INT. CONFERENCE ON DIGITAL AUDIO EFFECTS (DAFX-02), Hamburg, Germany, 2002
- NAYLOR, G. **Odeon - Another hybrid room acoustica model**. Applied Acoustics, v. 38(2-4), p. 131-143, 1993.
- NUNES, M.A.A. – **Utilização de Síntese Modal de Componentes e Particionamento Axial de Dutos para Controle de Modos Acústicos de Alta Ordem**. 222f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. **Discrete-time signal processing**. PRENTICE-HALL, 1999.
- OTONDO, F.; RINDEL, J. **A new method for the radiation representation of musical instruments in auralization**. Acta Acustica United with Acustica. v.91, p. 902-906, 2005.
- PETERS, ET AL **Responsive acoustic surfaces: computing sonic effects**. J. Acout. Soc. Am. v.130, Issue 4, 2011.
- PIERCE, A. D. **Acoustics: an introduction to its physical principles and applications**. Acoustical Soc of Amercia, 1989.
- PORTELA, M. **Caracterização de fontes sonoras e aplicação na auralização de ambientes**, Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2008.
- PUGLISI, G. E. **Acoustical of theorical urban open spaces through the insertion of vegetation as noise abetmente mean: parametric studies and pratical guidelines**, Politecnico di Torino.Tese de Doutorado,2012.
- RAGHUVANSHI, N., ET AL **Precomputed wave simulation for real-time sound propagation of dynamic sources in complex scenes**. ACM Transactions on Graphics (TOG), v.29, n.4, p.68, 2010.

RAMAKHRISHNAN, R.; DUMOULIN, R. **Acoustics simulation of worship spaces**. Canadian Acoustics, v9, n.3, p.56-57, 2011.

RAO, D.; B. X.; LIANG, Z. **Binaural Loudness Spectra Analysis of Individualized Binaural Room Impulse Response**, V. 50, n.5, p. 331-342 IEEE, 2009.

RAYNOISE, M. **Numerical Integration Technologies**. N.V, 1993.

RINDEL. **Evaluation of room acoustic qualities and defects by use of auralization**. 148TH MEETING OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 2004.

RINDEL, J. **The use of computer modeling in room acoustics**. Journal of Vibroengineering. V.4(3), p. 219-224, 2000.

RINDEL, J. H.; CHRISTENSEN, C. L. **Auralisation of a symphony orchestra with odeon - the chain from musical instruments to the eardrums**. PROC. OF THE EAA SYMPOSIUM ON AURALIZATION, p.15-17, Espoo: Finland, 2009.

RINDEL, J.; CHRISTENSEN, C. L. **Room Acoustic Simulation and Auralization - How close can we get to the real room?** WESPAC 8, THE EIGHTH WESTERN PACIFIC ACOUSTIC CONFERENCE, (p. Manuscript Number 1025J). Melbourne, 2003.

ROMEIRO, C. M. **Hardware para paralelização de Malhas de Guias de Ondas Digitais**, Dissertação de mestrado apresentada ao programa e pós graduação. Universidade de Aveiro: Departamento de eletrônica, telecomunicações e informática, 2001.

ROSÃO, V. **Contributo para a caracterização da qualidade acústica de casas de fado**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa. Lisboa, 2012.

ROSÃO, V.; INÁCIO, O. **Contributo para a avaliação da qualidade acústica de Casas de Fado**. VIII CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ACÚSTICA, Evora, Portugal, 2012.

SANT'ANA, D. **Avaliação acústica de edifícios religiosos**, Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2009.

SAVIOJA, ET AL. **Determination of the Low Frequency Behaviour of an IEC Linstening Room**. Helsinki, Finland: Proceedings of the Nordic Acousitcal Meeting NAM' , v.96, p. 637-641, 1996.

SAVIOJA; VALIMAKI, V. In: **Reduction of Dispersion Error iin the Triangular Digital Waveguide Mesh Using Frequency Warping**. IEEE Signal Processiong Letters, v. 6, n. 3. p. 58-60, 1999.

SAVIOJA, L. **Modeling Techniques for Virtual Acoustics**, Epoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2000.

SAVIOJA, L. E. **Creating Interactive Virtual Acoustic Environments**. J. Audio Eng. Soc. v.47. n. 9, p. 675-705, 1999.

SAVIOJA, ET.AL **Waveguide Mesh Method for Low Frequency Simulation of Room Acoustics**. PROCEEDINGS OF THE 15TH INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTIC (ICA), Trondheim, Norway, p. 637-641, 1995.

SAVIOJA, LOKKI, T. **Interactive room acoustic rendering in real time**. IEEE, p. 497-500, 2002.

SAVIOJA, L.; LOKKI, T.; HUOPANIEMI, J. **Auralization applying the parametric room acoustic modeling technique- the Diva Auralization System**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUDIOTORY DISPLAY, Kyoto, Japan, 2002.

SAVIOJA, L.; MANOCHA, D.; LIN, M. **Use of GPUs un room acoustic modeling and auralization**. IN: PROC. INT. SUMPOSIUM ON ROOM ACOOUTICS, 2010.

SCHROEDER, M. R. **Integrated- Impulse method measuring sound decay without using impulses**. Journal Acoustic Society of America. V. 66 (2), p. 497-500, 1979.

- SEGURA, ET AL **Comparison among measured and simulated binaural impulse responses in different rooms.** PROCEEDING OF 20TH INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, ICA: Sydney-Australia, 2010.
- SHTREPI, L.; ASTOLFI, A. **Influence of scattering coefficient on the prediction of room acoustic parameters in a virtual concert hall,** Proc. Of the 6th International Conference Material – Acoustics- Place. 2011.
- SILTANEN, S.; LOKKI, T.; SAVIOJA, L. **Rays or waves? Understanding the strengths and weaknesses of computational room acoustics modeling techniques.** PROC. IN SYMPOSIUM ON ROOM ACOUSTICS, 2010.
- SILTANEN, S.; LOKKI, T.; SAVIOJA, L.; CHRISTENSE, C. **Geometry reduction room acoustics modeling.** Acta Acustica united with acustica, v.94, p. 410-418, 2008.
- SINCLAIR, S.; SCAVONE, G.; WANDERLEY, M. **Audio-haptic interaction with the digital waveguide bowed string.** PROC. OF INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE, p. 275-278, 2009.
- SMITH, J. **Physical Modeling with Digital Waveguides.** Center of Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), Stanford University, USA: CA 94305, 1992.
- SOUTHERN, A.; SAVIOJA, L. **Spatial high frequency extrapolation method for room acoustic auralization.** PROC. IN CONF. ON DIGITAL AUDIO EFFECTES (DAFX-2012), N. York, 2012.
- SOUTHERN, A.; MURPHY, D.; WELLS, J. **Rendering walktrough auralisations using wave-based acoustical models.** IN: PROC. OF THE 17TH EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONF. EUSIPCO, 2009.
- SOUTHERN, A.; SILTANEN, S.; LAURI, S. **Spatial Room Impulse Response with a hybrid modeling method.** PROC. IN AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION, 2011.

- TAYLOR, M., ET AL. **Guided multiview ray tracing for fast auralization**. PROC. IN AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION, 2012.
- TENENBAUM, C. ;COELHO, J. **Engenharia acústica auxiliada por computador: um método híbrido para simulação de acústica de salas**. Anais do SEMEA, 2002.
- TENENBAUM, R., CAMILO, T. S. **Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Teoria, Implantação Computacional e Validação experimental**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 26-40: Laboratório de Acústica e Vibrações, 2004
- TÔRRES, M. **Simulação acústica no ambiente AcMus**, Dissertação de mestrado, Instituto de matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- VALADARES, V. M. **Acústica de Salas de Concerto**. I Seminário Brasileiro de Engenharia de Áudio – Belo Horizonte - MG, 2002.
- VAN DUYNE, S.; SMITH III, J. **The 3-D Tetrahedral Digital Waveguide Mesh with Musical Applications**. ICMC PROCEEDINGS, p. 9-16, 1996.
- VAN DUYNE, S.; SMITH III, J. O. **The tetrahedral digital waveguide mesh**. In: Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. IEEE ASSP Workshop on, p. 234-237, 1995.
- VAN DUYNE, S.; SMITHIII, J. **Physical Modeling with the 2D Digital Waveguide Mesh**. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE ICMC 93, TOKYO, 1993, pp. 40-47, 1993.
- VESA, S.; LOKKI, T. **Segmentation and analysis of early reflections from a binaural room impulse response**. Helsinki University of Technology: Technical Report TKK-ME-R-I, TKK Reports in Media Technology, 2010.

- VIAN, J.; MARTIN, J. **Binaural room acoustics simulation: Practical uses and applications**. Applied Acoustic, p. 293-305, 1992.
- VORLANDER, M. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. Germany: Springer, 2008.
- VORLANDER, M. **Auralization: Fundamentals of acoustics, modellund, simulation and acoustic virtual reality**. Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.
- XIANG, A.; BLAUERT, J. **Binaural scale modeling for auralization and prediction of acoustis in auditoria**. Applied Acoustic, v. 38, p. 297-290, 1993.
- XIE, H.; JIAN, K. **Sound field of typical single-bed hospital wards**. Applied Acoustic, V.73 n.9, p.884-892, 2012.

ANEXO 1

Processamento Digital de Sinais

O processamento digital de sinais serve como ferramenta para modelar, captar e sintetizar os sinais sonoros da fonte, recinto ou receptores, (Beranek; Mellow, 2012). Trata-se de um instrumento necessário para representar o áudio gerado pelo recinto e percebido pelos receptores, estrategicamente distribuídos no recinto. Para tanto, é tomado o cuidado de trabalhar com sinais dentro da faixa de audibilidade, sendo devidamente filtrados para cada banda de frequência de interesse.

Com o avanço da eletrônica nos últimos anos, a acústica sofreu um impacto positivo, alavancando sua atuação na manipulação de sinais de áudio, por intermédio do processamento digital. No caso particular de auralização implementado em sistemas computacionais, as teoria e técnicas sobre sinais, aliado ao conhecimento de propagação sonora, bem como, os parâmetros da psicoacústica, convergiram para sinais sonoros sintetizados em ambientes virtuais, permitindo ao usuário, escutar o áudio como se o mesmo tivesse sido reproduzido dentro do ambiente supracitado.

Um sinal, na abordagem de teoria dos sinais, é uma função temporal de uma quantidade física escalar, como a pressão sonora. Tal sinal pode ser gravado ou simulado, transmitido através do sistema, podendo sofrer alteração devido ao ambiente e finalmente, recebido por sensores ou pelo próprio ser humano.

Os sistemas de transmissão sonora acústicos podem ser aproximados por Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo (SLIT), que por definição, são sistemas que transmitem o som em forma contínua, independente do tempo real de ativação da excitação acústica. Os SLIT possuem algumas propriedades básicas:

- Causalidade: Um sistema físico realizável não pode produzir saída sem que haja uma entrada prévia;
- Estabilidade: As saídas de um sistema estável serão finitas se as entradas forem sinais finitos;
- Invariabilidade Temporal: Os parâmetros do sistema não variam ao longo do tempo, porém requiere condições constantes no ambiente, como por exemplo a

temperatura e umidade. Assim, as propriedades acústicas de propagação no meio a dos materiais que compõem a sala não sofrerão mudanças;

- Linearidade: O sistema possui a propriedade de superposição (adição e homogeneidade). Na primeira, se cada saída está relacionada a uma determinada entrada, a soma de todas as entradas produzirá a soma de todas as saídas. Na segunda propriedade, um sistema homogêneo produzirá uma saída multiplicada por um fator, se estiver multiplicando pela saída que a gerou. Em outras palavras, significa que o campo sonoro criado por fontes atuando simultaneamente é equivalente a soma das suas contribuições individuais.

Linearidade e invariância no tempo são combinadas em expressões SLTI, que por sua vez, podem ser descritos com respeito a suas reações para sinais no domínio do tempo e da frequência. Essas reações são unicamente representadas por resposta impulsiva (no domínio do tempo) ou por uma função transferência estacionária (no domínio da frequência).

1.1 – Convolução

A convolução trata-se de uma operação bastante difundida no campo de processamento de sinais. Um exemplo, é a implementação de um filtro digital, normalmente efetuada através da convolução direta do sinal de entrada com a resposta impulsiva do filtro. Ao estimar o conteúdo espectral de um sinal, a operação básica da autocorrelação é simplesmente a convolução do sinal com uma versão dele mesmo, porém, invertida no tempo. Na auralização, o resultado é obtido através da convolução do filtro resultante da modelagem com um som gravado da fonte sonora. (PORTELA, 2008).

Teoricamente, a Transformada de Laplace do produto de convolução entre duas funções f_l e g_l é igual ao produto das Transformadas de Laplace das duas funções.

Demonstrando matematicamente, a partir das definições da transformada de Laplace e do produto de convolução, obtém-se a Eq. (1):

$$L\{f_L * g_L\} = \int_0^\infty \int_0^t f_L(r_L) g_L(t - r_L) e^{-st} dr_L dt \quad (1)$$

A integral em r_L pode ser entendida até infinito ao multiplica-la por um a função degrau unitário que anule o trecho desde o tempo t até infinito, conforme a Eq.(2):

$$L\{f_L * g_L\} = \int_0^\infty \int_0^t f_L(r_L) g_L(t - r_L) u(t - r_L) e^{-st} dr_L dt \quad (2)$$

Trocando a ordem dos dois operandos integrais, obtém-se a Eq.(3):

$$L\{f_L * g_L\} = \int_0^\infty f_L(r_L) \left[\int_0^t g_L(t - r_L) u(t - r_L) e^{-st} dt \right] dr_L \quad (3)$$

O termo entre colchetes é a transformada de Laplace da função g_L , deslocada em t , Eq.(4):

$$g_L(t - r_L) u(t - r_L) \quad (4)$$

Pode-se observar que é igual à transformada de Laplace de g_L , multiplicada pela exponencial de $-sr_L$. Assim, se obtém o resultado expresso pela Eq.(5):

$$L\{f_L * g_L\} = G(s) \int_0^\infty f_L(r_L) e^{-sr_L} dr_L \quad (5)$$

Esse resultado é igual ao produto das transformadas de Laplace das duas funções como se pretendia demostrar, assim como escrito na Eq.(6):

$$L\{f_L * g_L\} = F(s)G(s) \quad (6)$$

O teorema anterior também implica que a transformada inversa de Laplace de um produto de funções é igual ao produto de convolução entre as transformadas inversas das duas funções. O produto de convolução entre funções verifica a propriedade comutativa, associativa e distributiva em relação à soma de funções.

2 – Transformada de Fourier

Conforme discutido anteriormente, um sistema físico ideal é definido como um sistema fisicamente realizável, que apresenta estabilidade, linearidade e parâmetros de valor constante. Tais sistemas possuem propriedades importantes para uma análise linear, pois suas características podem ser identificadas experimentalmente a partir da relação entre sinais de estímulo (entradas) e de respostas (saídas) medidos sobre o sistema.

Num Sistema Linear Invariante no Tempo a frequência é uma quantidade conservada, logo o comportamento de cada frequência pode ser resolvido independentemente. Além disso, uma das soluções para a análise do sistema, a partir da equação diferencial que rege o seu comportamento, é a Transformada de Fourier, cuja função é mudar o domínio dos dados, do tempo para a frequência. Trata-se de um recurso interessante, em virtude da manipulação matemática no domínio da frequência ser mais simples, (OPPENHEIM; SCHAFER, 1999).

A Transformada de Fourier $X(\omega)$ de um sinal de entrada $x(t)$ é definida pela Eq.(7):

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

Para retornar ao domínio do tempo, utiliza-se a transformada Inversa de Fourier, definida pela Eq.(8):

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (8)$$

Uma vez que o sinal esteja no domínio da frequência é possível representar uma situação semelhante ao apresentado na Fig.(1), em que o sinal de entrada no domínio do tempo $X(\omega)$ submetido a um SLIT obtem como saída o sinal $Y(\omega)$, também no domínio da frequência.



Figura 1: Representação da entrada e saída no domínio da frequência

Conhecido o sinal de entrada $X(\omega)$ e o sinal de saída $Y(\omega)$, pode-se determinar a Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema, $H(\omega)$, a partir da Eq.(10):

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (10)$$

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$$

Entretanto, para que a FRF represente a descrição completa das características do sistema, é necessário que o sinal de excitação possua todas as componentes de frequência. Idealmente, isso é obtido através da função Delta ou Delta de Dirac, $\delta(t)$, definida pela Eq.(11):

$$\delta(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_{\varepsilon}(t) \quad (11)$$

Onde são válidas as relações expressas pela Eq.(12) e (13):

$$f_{\varepsilon}(t) = 0, \text{ para } |t| > \varepsilon \quad (12)$$

$$f_{\varepsilon}(t) = \frac{1}{2\varepsilon}, \text{ para } t = 0 \quad (13)$$

A função delta de Dirac possui a seguinte propriedade, tal como apresentado pela Eq.(14):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (14)$$

As características da função Delta de Dirac são que sua área é igual a 1, sua amplitude tende para o infinito e seu tempo de duração para zero, e que em todas as frequências, sua transformada tem amplitude igual a 1. A resposta $h(t)$ de um sistema a uma excitação Delta é conhecida como Resposta Impulsiva e é representada pela Fig. 2.

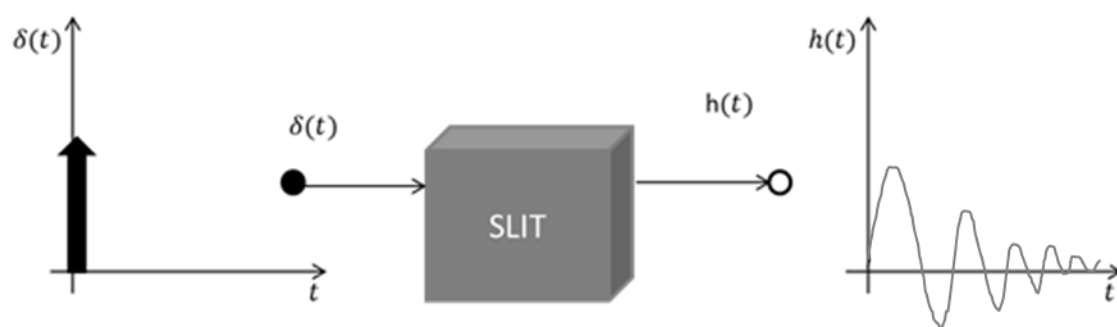


Figura 2: Resposta Impulsiva aplicada a um sistema linear invariante no tempo

Conhecida como $H(\omega)$, pode-se calcular $h(t)$ através da Transformada Inversa de Fourier. Além disso, é possível utilizar a convolução para determinar a resposta para uma excitação qualquer. A convolução de dois sinais $x(t)$ e $y(t)$ é dada pela Eq.(15):

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_0^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \rightarrow Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (15)$$

Onde o sinal $*$ indica a convolução dos sinais.

O limite inferior de integração é zero em razão da casualidade, dado que um sistema fisicamente não pode produzir uma saída antes que um sinal seja aplicado em sua entrada. A estabilidade do sistema limita a saída a sinais finitos para todos os sinais de entrada finitos.

O sistema será invariante no tempo se seus parâmetros tiverem valor constante. Assim, a resposta do sistema $h(t)$ será constante para qualquer valor de tempo.

APÊNDICE 1

Trecho de Código SWG sem barreira

```
%===Propriedade da Malha=====
fs=4*fa;          % [Hz]
ds=c*sqrt(2)/fs;
%=====

no= ceil(comp/ds); % numero de pontos
max_step= time*fs; % numero de fotografias do sistema
state0= zeros(no,no);
state1= zeros(no,no);
state2= zeros(no,no);

%===Coeficiente de Reflexibilidade das Paredes=====
r1= -0.96;
r2= -0.96;
r3= -0.96;
r4= -0.96;

%===Condições de contorno=====
state0(1,:)=0;
state0(no,:)=0;
state0(:,1)=0;
state0(:,no)=0;
state1(1,:)=0;
state1(no,:)=0;
state1(:,1)=0;
state1(:,no)=0;
state2(1,:)=0;
state2(no,:)=0;
state2(:,1)=0;
state2(:,no)=0;

%=====
sensor=zeros(max_step,4);
nleste=0;
noeste=0;
nnorte=0;
nsul=0;
b=0;
a=1;
m1=ceil(xs1/ds);
m2=ceil(xs2/ds);
```

```

%h1= figure('DOUBLEBUFFER','On');
%mov = avifile('Filme1.avi','quality',100); % Cria um arquivo avi
for t=0:1/fs:time-1/fs
    for i=2:no-1
        for j=2:no-1
            nleste=state1(i+1,j);
            noeste=state1(i-1,j);
            nnorte=state1(i,j+1);
            nsul=state1(i,j-1);
            b=state0(i,j);
            if t<(1/fa)
                state2(ceil(x/ds),ceil(y/ds))=A*sin(3.1415*fa*t);
            end
            state2(i,j)=0.5*(nleste+noeste+nnorte+nsul)-b;
        end
    end
    end
%===Impedancia de reflexão=====
    state2(1,:)=(1 + r1) * state1(2,:) - r1 * state0(1,:);
    state2(no,:)=(1 + r2) * state1(no-1,:) - r2 * state0(no,:);
    state2(:,1)=(1 + r3) * state1(:,2) - r3 * state0(:,1);
    state2(:,no)=(1 + r4) * state1(:,no-1) - r4 * state0(:,no);

%=== Impedancia do ser humano =====
    state2(1,:)=(1 + r1) * state1(2,:) - r1 * state0(1,:);
    %state2(m1)= (1 + r2) * ( state1(m1-1) + state1(m1+1) ) - (1 + 2*r2) * state0(m1);
%=====
==
%===Armazenamento no sensor=====
    sensor(a,1)=t;
    sensor(a,2)=state2(ceil(x/ds),ceil(y/ds));
    sensor(a,3)=state2(m1,no-10);
    sensor(a,4)=state2(m2,no-10);

%=====
==
%===Atualização=====
    state0=state1;
    state1=state2;
%=====
==
    surf(state2,'LineStyle','none','FaceLighting','gouraud','FaceColor','interp');colormap
jet;
    zlim([-5 5]);
    view(-6,62);
    pause(0.2);
    % F=getframe(gca);
    % mov=addframe(mov,F);
    % drawnow
    a=a+1;
end
%mov=close(mov);
hold on

```

```

plot(sensor(:,3),'r')
plot(sensor(:,4),'d')
hold off
toc;

```

Trecho de Código do Software ANSYS de uma sala 2D sem barreira (Elementos Finitos)

```

/PREP7
ET,1,FLUID29
ET,2,FLUID29
KEYOPT,2,2,1
KEYOPT,2,3,0
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1.21
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,SONC,1,,342
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MU,1,,.1
RECTNG,0,4,0,3,
TYPE, 1
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-4
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,Y
LESIZE,_,Y1,0.05,,,,,,,,1
TYPE, 2
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
TYPE, 2
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,

```

```

FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
AESIZE,P51X,0.05,
MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
*DO,i,1,20,1
    FLST,5,1,1,ORDE,1
    FITEM,5,5611
    CM,_Y,NODE
    NSEL,R, , , P51X
    CM,_Y1,NODE
    CMSEL,S,_Y
    CMDELE,_Y
    /GO
    D,_Y1,PRES,sin(0.0005*i*2*3.1415*100)
    CMDELE,_Y1
    OUTPR,ALL,ALL,
    OUTRES,ALL,ALL,
    TIME,0.0005*i
    AUTOTS,-1
    DELTIM,0.0001*i, , , 1
    KBC,1
    TSRES,ERASE
    LSWRITE,i,
    DDELE,5611,PRES
*ENDDO

```

```

FLST,5,1,1,ORDE,1
FITEM,5,5611
CM,_Y,NODE
NSEL,R, , , P51X
CM,_Y1,NODE
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
/GO
D,_Y1,PRES,

```

```

        CMDELE,_Y1 OUTPR,ALL,ALL,
        OUTRES,ALL,ALL,
TIME,0.05
        AUTOTS,-1
        DELTIM,0.0005, , ,1
        KBC,1
        TSRES,ERASE
        LSWRITE,21,
LSSOLVE,1,21,1,
/POST26
FILE,'wave','rst',''
NSOL,3,5611,PRES,,
/AXLAB,X,TEMPO [s]          !* X label
/AXLAB,Y,TEMPERATURA [K]    !* Y label
PLVAR,3, , , , , , , , ,
FINISH                      !*Plotando o gráfico

```

Malha TWG

```

clc;
clear all;
tic;

fs=4*fa;          % [Hz]
ds=c*sqrt(3)/fs;
%=====

no= ceil(comp/ds); % numero de pontos
noy=ceil(larg/ds);

max_step= time*fs; % numero de fotografias do sistema
state0= zeros(no,noy);
state1= zeros(no,noy);
state2= zeros(no,noy);
%==Coeficiente de Reflexibilidade das Paredes=====
r1= -0.9;
r2= -0.9;
r3= -0.9;
r4= -0.9;

%=====
%Posição das paredes do obstáculo
xbi=1.9;
ybi=5;
%==Condições de contorno=====
state0(1,:)=0;
state0(no,:)=0;
state0(:,1)=0;
state0(:,noy)=0;
state1(1,:)=0;
state1(no,:)=0;

```

```

state1(:,1)=0;
state1(:,noy)=0;
state2(1,:)=0;
state2(no,:)=0;
state2(:,1)=0;
state2(:,noy)=0;

%=====
sensor=zeros(max_step,4);
nleste=0;
noeste=0;
nnoroeste=0;
nsudeste=0;
nnordeste=0;
nsudoeste=0;

b=0;
a=1;

%h1= figure('DOUBLEBUFFER','On');
%mov = avifile('Filme1.avi','quality',100); % Cria um arquivo avi
ad=0;

for t=0:1/fs:38/fs%time-1/fs
    for i=2:no-1
        for j=2:noy-1
            nleste=state1(i+1,j);
            noeste=state1(i-1,j);
            nnoroeste= 0.5*(state1(i-1,j+1)+state1(i,j+1));
            nsudeste=0.5*(state1(i+1,j-1)+state1(i,j-1));
            nnordeste=0.5*(state1(i+1,j+1)+state1(i,j+1));
            nsudoeste=0.5*(state1(i-1,j-1)+state1(i,j-1));
            b=state0(i,j);
            if t<(1/fa)
                state2(ceil(x/ds),ceil(y/ds))=A*sin(3.1415*fa*t);
            end
            state2(i,j)=(1/3)*(nleste+noeste+nnoroeste+nsudeste+nnordeste+nsudoeste)-b;

            if j==ceil(ybi/ds)
                if i>ceil(xbi/ds)
                    state2(i,j)=(1 + rp) * ( state1(i,j-1) + state1(i,j+1) ) - (1 + (2*rp)) * state0(i,j);
                end
            end
        end
    end
end

%==Impedancia de reflexão=====
state2(1,:)=(1 + r1) * state1(2,:) - r1 * state0(1,:);
state2(no,:)=(1 + r2) * state1(no-1,:) - r2 * state0(no,:);
state2(:,1)=(1 + r3) * state1(:,2) - r3 * state0(:,1);
state2(:,noy)=(1 + r4) * state1(:,noy-1) - r4 * state0(:,noy);

```

```

%=====
==
%===Armazenamento no sensor=====
    sensor(a,1)=t;
    sensor(a,2)=state2(ceil(x/ds),ceil(y/ds));
    sensor(a,3)=state2(ceil(xs1/ds),ceil(ys1/ds));
    sensor(a,4)=state2(ceil(xs2/ds),ceil(ys1/ds));
    ad=ad+1
%=====
==
%===Atualização=====
    state0=state1;
    state1=state2;
%=====
==
    surf(state2,'LineStyle','none','FaceLighting','gouraud','FaceColor','interp');colormap
jet;
    zlim([-5 5]);
    axis equal;
    view(3)
    pause(0.2);
% F=getframe(gca);
% mov=addframe(mov,F);
% drawnow
    a=a+1;
end

%mov=close(mov);

hold on
plot(sensor(:,1),sensor(:,2),'b')
plot(sensor(:,1),sensor(:,3),'r')
plot(sensor(:,1),sensor(:,4),'g')
hold off

savefile='tempo.txt';
psave = sensor(:,1);
save(savefile,'psave','-ASCII');
savefile='fonte.txt';
psave = sensor(:,2);
save(savefile,'psave','-ASCII');
savefile='rec1.txt';
psave = sensor(:,3);
save(savefile,'psave','-ASCII');
savefile='rec2.txt';
psave = sensor(:,4);
save(savefile,'psave','-ASCII');
toc;

```

Malha Cúbica

```

for(int i=0;i<no_x;i++) {
    state0[i]=new float*[no_y];
    state1[i]=new float*[no_y];
    state2[i]=new float*[no_y];
    for(int j=0;j<no_y;j++) {
        state0[i][j]=new float[no_z];
        state1[i][j]=new float[no_z];
        state2[i][j]=new float[no_z];
        for(int k=0;k<no_z;k++) {
            state0[i][j][k]=0.0;
            state1[i][j][k]=0.0;
            state2[i][j][k]=0.0;
        }
    }
}

float nleste=0;
float noeste=0;
float nnorte=0;
float nsul=0;
float nfrente=0;
float ntras=0;
float b=0;
float dt=1/fs;
int Npto=time/dt;
float *sensor=new float[Npto];
float t=0.;
ProgressBar1->Min=0;
ProgressBar1->Max=Npto;
ProgressBar1->Step=Npto/100;
for(int i_tempo=0;i_tempo<Npto;i_tempo++) {
    for(int i=1;i<no_x-2;i++) {
        for(int j=1;j<no_y-2;j++) {
            for(int k=1;k<no_z-2;k++) {
                nleste=state1[i+1][j][k];
                noeste=state1[i-1][j][k];
                nnorte=state1[i][j+1][k];
                nsul=state1[i][j-1][k];
                nfrente=state1[i][j][k+1];
                ntras=state1[i][j][k-1];
                b=state0[i][j][k];
                if(t<1./4000) state2[x][y][z]=A*sin(3.1415*fa*t);
                state2[i][j][k]=0.25*(nleste+noeste+nnorte+nsul+nfrente+ntras)-b;
            }
        }
    }
}

```

```

//%===Impedancia de reflexão=====
for(int j=0;j<no_y;j++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[0][j][k]=(1 + r1) * state1[1][j][k] -
r1 * state0[0][j][k];
for(int j=0;j<no_y;j++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[no_x-1][j][k]=(1 + r1) *
state1[no_x-2][j][k] - r1 * state0[no_x-1][j][k];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[i][0][k]=(1 + r2) * state1[i][1][k] -
r1 * state0[i][0][k];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[i][no_y-1][k]=(1 + r2) *
state1[i][no_y-2][k] - r1 * state0[i][no_y-1][k];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int j=0;j<no_y;j++) state2[i][j][0]=(1 + r3) * state1[i][j][1] - r1 *
state0[i][j][0];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int j=0;j<no_y;j++) state2[i][j][no_z-1]=(1 + r3) *
state1[i][j][no_z-2] - r1 * state0[i][j][no_z-1];
//%=====
===
//%===Armazenamento no sensor=====
sensor[i_tempo]=state2[xs][ys][zs];
//%=====
===
//%===Atualização=====
=
state_aux=state0;
state0=state1;
state1=state2;
state2=state_aux;
t=t+dt;
if(i_tempo%1000==0) {
    ProgressBar1->Position=i_tempo;
    Sleep(20);
}
}
if(SaveDialog1->Execute()) {
    FILE *fp=fopen(SaveDialog1->FileName.c_str(),"wt");
    for(int i=0;i<Npto;i++) fprintf(fp,"%e \n",sensor[i]);
    fclose(fp);
}
}
//-----

```

```

void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
    float comp=3;          // [m]
    float larg=2.5;
    float alt=2;
    //%===Propriedade do meio=====
    float c=342;          // % Velocidade
    float r1= -0.15;      // %coeficiente de reflexao
    float r2= -0.15;
    float r3= -0.15;
    float r4= -0.15;

```

```

//%=====
//%===Propriedade do sinal=====
float fa=100; //      % [Hz]
float A=1;    //      % [A]
//%=====
float time=5; //      % [seg]
//%===Propriedade da Malha=====
float fs=4*fa; //      % [Hz]
float ds=c*sqrt(3)/fs;
//%=====
//%=====
//%===Posição da Fonte=====
int x=1./ds;
int y=1./ds;
int z=1.2/ds;
//%=====
//%===Posição do Sensor=====
int xs=2.5/ds;
int ys=2.0/ds;
int zs=1.6/ds;

int no_x,no_y,no_z;
no_x=(int) (comp/ds);
no_y=(int) (larg/ds);
no_z=(int) (alt/ds);

float ***state0,***state1,***state2;
state0=new float**[no_x];
state1=new float**[no_x];
state2=new float**[no_x];
float ***state_aux;
for(int i=0;i<no_x;i++) {
    state0[i]=new float*[no_y];
    state1[i]=new float*[no_y];
    state2[i]=new float*[no_y];
    for(int j=0;j<no_y;j++) {
        state0[i][j]=new float[no_z];
        state1[i][j]=new float[no_z];
        state2[i][j]=new float[no_z];
        for(int k=0;k<no_z;k++) {
            state0[i][j][k]=0.0;
            state1[i][j][k]=0.0;
            state2[i][j][k]=0.0;
        }
    }
}

float nleste=0;
float noeste=0;
float nnorte=0;
float nsul=0;

```

```

float nfrente=0;
float ntras=0;
float b=0;
float dt=1/fs;
int Npto=time/dt;
float *sensor=new float[Npto];
float t=0.;
ProgressBar1->Min=0;
ProgressBar1->Max=Npto;
ProgressBar1->Step=Npto/100;
for(int i_tempo=0;i_tempo<Npto;i_tempo++) {
    for(int i=1;i<no_x-2;i++) {
        for(int j=1;j<no_y-2;j++) {
            for(int k=1;k<no_z-2;k++) {
                nleste=state1[i-1][j-1][k]; //leftback
                noeste=state1[i+1][j+1][k]; //righfront
                nnorte=state1[i+1][j][k+1]; //rightup
                nsul=state1[i-1][j][k-1]; //leftdown
                nfrente=state1[i][j+1][k+1]; //frontup
                ntras=state1[i][j-1][k-1]; //backdown
                b=state0[i][j][k];
                if(t<1./4000) state2[x][y][z]=A*sin(3.1415*fa*t);
                state2[i][j][k]=0.25*(nleste+noeste+nnorte+nsul+nfrente+ntras)-b;
            }
        }
    }
}

//%===Impedancia de reflexão=====
for(int j=0;j<no_y;j++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[0][j][k]=(1 + r1) * state1[1][j][k] -
r1 * state0[0][j][k];
for(int j=0;j<no_y;j++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[no_x-1][j][k]=(1 + r1) *
state1[no_x-2][j][k] - r1 * state0[no_x-1][j][k];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[i][0][k]=(1 + r2) * state1[i][1][k] -
r1 * state0[i][0][k];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int k=0;k<no_z;k++) state2[i][no_y-1][k]=(1 + r2) *
state1[i][no_y-2][k] - r1 * state0[i][no_y-1][k];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int j=0;j<no_y;j++) state2[i][j][0]=(1 + r3) * state1[i][j][1] - r1 *
state0[i][j][0];
for(int i=0;i<no_x;i++) for(int j=0;j<no_y;j++) state2[i][j][no_z-1]=(1 + r3) *
state1[i][j][no_z-2] - r1 * state0[i][j][no_z-1];
//%=====
===
//%===Armazenamento no sensor=====
sensor[i_tempo]=state2[xs][ys][zs];
//%=====
===
//%===Atualização=====
=
state_aux=state0;
state0=state1;
state1=state2;
state2=state_aux;
t=t+dt;

```

```
if(i_tempo%1000==0) {  
    ProgressBar1->Position=i_tempo;  
    Sleep(20);  
}  
}  
if(SaveDialog1->Execute()) {  
    FILE *fp=fopen(SaveDialog1->FileName.c_str(),"wt");  
    for(int i=0;i<Npto;i++) fprintf(fp,"%e \n",sensor[i]);  
    fclose(fp);  
}
```

APÊNDICE 2

O laboratório de Acústica e Vibrações situa-se na Universidade Federal de Uberlândia e sua localização dentro do Campus Santa Mônica é indicada na Figura 1 a seguir:



Figura 1: Vista aérea da Universidade Federal de Uberlândia, em destaque o prédio em que se situa o Laboratório de Acústica e Vibrações e a sala em que os ensaios foram realizados. Imagem obtida pelo site <https://maps.google.com.br/>, data de acesso: 29-10-2013.

A Tabela 1 mostra os 15 valores devidamente filtrados e medidos no Microfone 1 em azul e Microfone 2 em vermelho. Nas 6 bandas de frequência analisadas.

