



AVALIAÇÃO DE MODELOS ESTATÍSTICOS PARA SIMULAÇÃO DA CAUDA REVERBERANTE EM ACÚSTICA DE SALAS

Gabriel de Vilhena Torres

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Mariane Rembold Petraglia
Julio Cesar Boscher Torres

Rio de Janeiro
Julho de 2020

AVALIAÇÃO DE MODELOS ESTATÍSTICOS PARA SIMULAÇÃO DA CAUDA
REVERBERANTE EM ACÚSTICA DE SALAS

Gabriel de Vilhena Torres

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientadores: Mariane Rembold Petraglia
Julio Cesar Boscher Torres

Aprovada por: Prof. Julio Cesar Boscher Torres
Prof. Mariane Rembold Petraglia
Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto
Dr. Zemar Martins de Filippo Soares

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2020

de Vilhena Torres, Gabriel

Avaliação de Modelos Estatísticos para Simulação da Cauda Reverberante em Acústica de Salas/Gabriel de Vilhena Torres. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XIV, 83 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Mariane Rembold Petraglia

Julio Cesar Boscher Torres

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 80 – 83.

1. Simulação Acústica. 2. Traçado de Raios. 3. Cauda Reverberante. I. Rembold Petraglia, Mariane *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Los seis días [...], le habían servido para descubrir lo fútil de todos los orgullos humanos y la dimensión exacta de su insignificancia cósmica ante la potencia esencial de lo eterno.

*Leonardo Padura,
El Hombre que Amaba a los Perros*

Aleister Crowley, o famoso bruxo inglês, quando iniciado na ordem da Golden Dawn, tomou para si o nome de *Perdurabo*. Com esse gesto, Crowley dizia para os seus companheiros na senda mística que ele “iria até o fim”. Consideradas as devidas proporções, termino este trabalho com o sentimento de que eu também fui até o fim. Nesse sentido, gostaria de expressar meus sentimentos de profunda gratidão com todos aqueles que, de alguma maneira, me ajudaram a concluir esta etapa.

Agradeço aos meus orientadores, Julio e Mariane, pela sugestão do tema e terem concordado com a minha loucura de fazer uma dissertação, partindo do zero, em 6 meses. A paciência do Julio em me explicar os conceitos de acústica e o ímpeto de chegar nos resultados o quanto antes foi totalmente dialético, tenho que reconhecer. Devo à ele os acertos deste trabalho, os erros, admito, são todos meus. Agradeço aos integrantes da banca Dr. Zemar Soares e Prof. Augusto Pinto pelo tempo que dedicaram à leitura deste trabalho e aos comentários feitos.

Comecei minha vida profissional na Engenho desenvolvendo modelos matemáticos e atacando diferentes problemas do setor elétrico. No início, trabalhei para o Jacques Szczupak empregando técnicas, algoritmos e modelos de processamentos de sinais para descrever, simular e sintetizar a dinâmica climatológica de variáveis relevantes para o setor elétrico. Sou muito grato por tudo que aprendi, não apenas sobre climatologia e processamento de sinais, mas sobre ciência/tecnologia, a vida acadêmica e como atacar problemas complexos de maneira inteligente. Acredito que dificilmente teria reunido o ânimo de fazer um mestrado em processamento de

sinais sem esta experiência. Agradeço ao Alexandre Lafranque e ao Rafael Cancellata que sempre me ajudaram a ter uma visão holística dos projetos em que eu trabalhei. Pelas discussões técnicas – sempre de alto nível – e por fazerem esse mundo que é o setor elétrico – com seus agentes, mecanismos e siglas intermináveis – um pouco menos complicado pra mim. O Bruno Granatto, durante um ano, me atuou, bravamente, como seu supervisor. Foi divertido ter com quem compartilhar sobre algoritmos adaptativos, fatoração rápida de matrizes e correlações obscuras em eventos climáticos extremos. Agradeço ao Gustavo Kusdra, ao Guilherme Salles e ao Ricardo Marinho pelo convívio nas etapas finais.

Agradeço à gestão da área de tecnologia do Banco BOCOM BBM – Carlos Jordan, Cássio Alves, Eduardo Oliveira, Luiz Évora, Melanie Leão, Rafael Rozendo, Vanderson Pontes – que me contratou mesmo quando eu dedicava parte do meu tempo à esta dissertação que, na melhor das hipóteses, é irrelevante para as atividades diárias da empresa, valorizando, dessa forma, o meu treinamento e formação. Agradeço aos colegas da Tecnologia por fazerem da área um ambiente amistoso, estimulante e desafiador. Em especial, aos colegas do Tropa (antigo e atual) – Felipe Santos, Matheus Prates, Matheus Popst, Pedro Lee, Rodrigo Camargo, Victor Nascimento – por terem me acolhido e por tudo que eu aprendi.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais – Milton e Vânia – pelo apoio incondicional. Meu pai, com seu *habitus* de professor despertou em mim o gosto pelas artes e pela ciência. Tudo que eu sei, são variantes – mais ou menos desenvolvidas, rigorosas, científicas ou complexas – do que ele me ensinou passando pelos solos do Rick Wakeman, os livros do Hermann Hesse, Umberto Eco, Neil Gaiman e, claro, das questões filosóficas profundas em *Blade Runner* (1982). Minha mãe me mostrou que na vida, apesar dos desafios aparentemente intransponíveis, não existem caminhos fechados. Jamais teria chegado ao fim deste projeto sem este ensinamento, jamais teria chegado ao fim deste projeto sem os meus pais.

Agradeço aos professores que tive na COPPE e por tudo que aprendi: seja via positiva ou *via negativa*. Em especial, ao Adilson Xavier, do PESC, que, no segundo trimestre de 2017, ministrou o curso de otimização não-linear mesmo com apenas um aluno inscrito: eu. O que era pra ser um curso padrão se transformou em um verdadeiro *tour de force* científico e cultural abrangendo temas tão diversos quanto o polinômio de Wilkinson, por que o BFGS é tão bom, Lenin e os advogados e como resolver problemas não lineares e não diferenciáveis – como hub location, covering e clusterização – pelo método dos elefantes voadores (suavização hiperbólica). Acredito que tenha sido meu segundo curso em “como atacar problemas complexos de maneira inteligente” e em muito contribuiu para minha formação.

Aos amigos que a UFRJ me deu. Foi (e é) muito gratificante ter com quem compartilhar as aventuras e aspirações acadêmicas e profissionais: Carlos Viana, Felipe

Gonzalez, Felipe Petraglia, Gustavo Martins, Henrique Gonçalves, Pedro Bandeira, Pedro Fonini, Lucas Oliveira e João Victor. Ao Leonardo dos Santos e ao Michel Moraes que iniciaram o mestrado comigo e que nos momentos mais difíceis ainda conseguiam dizer “vai dar bom”. Aos amigos da vida, em especial Diogo Inagaki, Gabriel Salles, Lucas Oliveira e Sérgio Félix por não fazerem a mínima ideia em que eu estava trabalhando e por me tirarem de casa quando eu precisava.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DE MODELOS ESTATÍSTICOS PARA SIMULAÇÃO DA CAUDA REVERBERANTE EM ACÚSTICA DE SALAS

Gabriel de Vilhena Torres

Julho/2020

Orientadores: Mariane Rembold Petraglia
Julio Cesar Boscher Torres

Programa: Engenharia Elétrica

O método traçado de raios, desde sua criação em 1968, apresenta, dentro de certos limites, uma solução simples e confiável para o problema da simulação acústica de salas. Em alguns ambientes, por outro lado, o método do traçado de raios demanda um grande tempo para conseguir uma estimativa apropriada da cauda reverberante. Neste trabalho, uma maneira de contornar essa limitação é descrita, onde um modelo estatístico para a cauda de respostas ao impulso de salas é apresentado. A síntese estatística proposta é computacionalmente mais competitiva do que a geração da estimativa da cauda reverberante pelo método de traçado de raios. O método proposto é avaliado comparando-se os parâmetros de qualidade acústica obtidos por simulação e medidos para diferentes salas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF STATISCAL MODELS FOR THE REVERBERATION TAIL
IN ROOM ACOUSTICS

Gabriel de Vilhena Torres

July/2020

Advisors: Mariane Rembold Petraglia

Julio Cesar Boscher Torres

Department: Electrical Engineering

The ray tracing algorithm, since its creation in 1968, provides a simple yet reliable solution to the room acoustic simulation problem. In certain rooms, however, properly estimating the reverberant tail using the ray tracing technique can be very time consuming. In this work, we describe a way to deal with this constraint, by defining a statistical model for the tail of room impulse responses. The statistical synthesis is computationally more competitive than properly estimating the reverberant tail via ray tracing. We evaluate the proposed method by comparing simulated and real acoustic descriptors for different rooms.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Propagação Sonora	5
2.1.1 Reflexão	7
2.2 Resposta ao Impulso de Salas	8
2.2.1 Síntese da Cauda Reverberante	9
2.3 Simulação Acústica de Salas	9
2.3.1 Acústica Geométrica de Salas	10
2.4 Parâmetros de Qualidade Acústica	13
2.5 Sinais e Sistemas Lineares	15
2.6 Probabilidade, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos	20
2.6.1 Média e Variância	21
2.6.2 Distribuição Gaussiana	21
2.6.3 Distribuição de Poisson	22
2.6.4 Distribuição Uniforme	24
2.6.5 Distribuição de Bernoulli	25
2.6.6 Processos Estocásticos	25
2.6.7 Ruído Rosa	26
2.6.8 Ruído Velvet	27
3 Análise dos Ruídos	30
3.1 Síntese das Caudas Reverberantes	32
3.1.1 Síntese do Ruído	32

3.1.2	Filtros Utilizados	32
3.1.3	Decaimento Energético	33
3.2	Avaliação das RIRs Sintetizadas	35
3.2.1	Ruído Gaussiano	37
3.2.2	Ruído Rosa	37
3.2.3	Ruído com Distribuição Uniforme	39
3.2.4	Ruído com Distribuição de Poisson	39
3.2.5	Ruído com Distribuição de Bernoulli	40
3.2.6	Ruído Velvet	42
3.3	Discussão dos Resultados	43
4	Incorporação da Cauda Reverberante Sintetizada à Resposta Simulada	48
4.1	Metodologia para Mesclagem da Cauda Reverberante	50
4.2	Determinação do Instante de Mesclagem	55
4.3	Resultados das Simulações	56
4.4	Discussão dos Resultados	69
5	Validação do Método Proposto	70
5.1	Resultados das Simulações	74
5.2	Discussão	74
6	Conclusões	78
6.1	Trabalhos Futuros	79
	Referências Bibliográficas	80

Lista de Figuras

1.1	Partes de uma resposta ao impulso típica de salas.	2
2.1	Reflexão sonora em um plano.	11
2.2	Ilustração do conceito de Imagem.	12
2.3	Etapas do cálculo da IR a partir do ecograma.	14
2.4	(a) Representação no domínio do tempo do sinal <i>Chirp</i> e (b) sua transformada de Fourier.	19
2.5	Espectrograma do sinal <i>Chirp</i>	20
2.6	Sorteio de uma distribuição gaussiana com os respectivos histogramas para diferentes valores de σ^2	22
2.7	Sorteio de uma distribuição de Poisson com os respectivos histogramas para diferentes valores de λ	23
2.8	Sorteio de uma distribuição uniforme com os respectivos histogramas para diferentes valores de a e b	24
2.9	Sorteio de uma distribuição de Bernoulli com os respectivos histogramas para diferentes valores de p	26
2.10	Magnitude quadrática da resposta em frequência referente ao filtro da Eq. (2.50).	27
2.11	Ruído Rosa e espectro de potência associado para diferentes valores de σ^2	28
2.12	(a) Realização do ruído Velvet com $F_s = 100$ Hz e (b) espectro de potência associado.	29
3.1	Vista superior da sala de medições.	31
3.2	Tempo de reverberação em função da frequência para os dois cenários estudados.	31
3.3	Síntese da cauda reverberante.	32
3.4	Resposta em frequência dos filtros passa-faixa.	33
3.5	Ajuste da EDC pelas Eqs. (3.1) e (3.2) para a frequência de 250 Hz no caso com absorção.	35

3.6	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído branco Gaussiano para o caso sem absorção.	37
3.7	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído branco Gaussiano para o caso com absorção.	38
3.8	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído rosa para o caso sem absorção.	38
3.9	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído rosa para o caso com absorção.	39
3.10	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído uniforme para o caso sem absorção.	40
3.11	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído uniforme para o caso com absorção.	40
3.12	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Poisson para o caso sem absorção.	41
3.13	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Poisson para o caso com absorção.	42
3.14	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Bernoulli para o caso sem absorção.	43
3.15	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Bernoulli para o caso com absorção.	44
3.16	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Velvet para o caso sem absorção.	45
3.17	Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Velvet para o caso com absorção.	46
4.1	IRs medidas na sala descrita na Fig. 3.1.	51
4.2	IRs simuladas pelo traçado de raios para a sala da Fig. 3.1.	51
4.3	Simulação do traçado de raios para a sala da Fig. 3.1 na faixa de 1kHz para os 2 casos considerados: com e sem absorção – (a) e (b) – e a energia acumulada de cada série em (c) e (d), respectivamente.	52
4.4	Cauda artificial para frequências em torno de 1 kHz.	53
4.5	Comparação do decaimento energético nas diferentes faixas de frequência para o caso sem absorção.	53
4.6	Comparação do decaimento energético nas diferentes faixas de frequência para o caso com absorção.	54
4.7	Resultado final do processo: IR simulada e cauda reverberante sintetizada.	54
4.8	Medições dos parâmetros de qualidade acústica para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1.	57
4.9	Medições dos parâmetros de qualidade acústica para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1.	58

4.10	Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 3.	59
4.11	Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 3.	60
4.12	Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 5.	61
4.13	Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 5.	62
4.14	Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 7.	63
4.15	Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 7.	64
4.16	Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 10.	65
4.17	Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 10.	66
4.18	Instante inicial da cauda reverberante para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, para diferentes ordens máximas de reflexões (O_M) e limiares energéticos (curvas em diferentes cores).	67
4.19	Instante inicial da cauda reverberante para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, para diferentes ordens máximas de reflexões (O_M) e limiares energéticos (curvas em diferentes cores).	68
5.1	Planta baixa da Sala de Ensaio da Escola de Música da UFRJ.	71
5.2	Planta baixa do Teatro Armando Gonzaga.	71
5.3	IRs medidas das duas salas estudadas neste capítulo.	72
5.4	Medições da Clareza e da Definição para a Sala de Ensaio da Escola de Música da UFRJ da Fig. 5.1.	72
5.5	Medições do tempo de reverberação e do tempo central para a Sala de Ensaio da Escola de Música da UFRJ da Fig. 5.1.	72
5.6	Medições da Clareza e da Definição para o Teatro da Fig. 5.2.	73
5.7	Medições do tempo de reverberação e do tempo central para o Teatro da Fig. 5.2.	73
5.8	Erros observados nas simulações da Sala de Ensaio com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$	75
5.9	Início da cauda reverberante para a Sala de Ensaio com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$	75
5.10	Erros observados nas simulações do Teatro com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$	76
5.11	Início da cauda reverberante para o Teatro com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$	76

Lista de Tabelas

3.1	Resultados consolidados das simulações para os casos com e sem absorção.	47
-----	--	----

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Avaliar a qualidade acústica de um determinado ambiente é uma tarefa fundamental, seja no projeto de teatros, salas de aula, de concerto ou no planejamento urbano. Embora estejamos a todo instante imersos em ambientes das mais diferentes características acústicas, dificilmente sabemos explicar – de maneira precisa – porque determinado ambiente possui uma acústica “boa” ou “ruim”.

Com o objetivo de sistematizar essa avaliação utilizam-se diversos parâmetros – cujas medições possuem metodologia rigorosa – que, em conjunto, podem ser usados para se estabelecer a qualidade acústica de um ambiente. Evidentemente, tais parâmetros devem traduzir em valores as características físicas do som e da percepção humana, de forma a correlacionar a percepção, que é subjetiva, com fatores objetivos.

É possível avaliar objetivamente a qualidade acústica de um ambiente calculando-se parâmetros, tais como o fator de clareza ou reverberação. Tais parâmetros são obtidos através da Resposta ao Impulso da Sala (do inglês, *Room Impulse Response* ou RIR). As RIRs podem ser medidas, no caso de salas que existam de fato, ou simuladas, no caso do projeto ou análise de um ambiente. Para cada par fonte-receptor tem-se uma resposta ao impulso (RI), e a média de sinais de diversas combinações de fontes e receptores dá origem à resposta da sala (RIR).

Portanto, no caso de projeto e análise de ambientes reais ou ainda em fase de elaboração, a *Simulação Acústica* mostra-se uma alternativa viável, desde que consiga reproduzir adequadamente os fenômenos acústicos da propagação da onda dentro dos recintos. Para simular a acústica de uma sala há diversas soluções disponíveis. Os métodos encontrados na literatura podem ser divididos em dois grupos: os que utilizam uma abordagem energética baseada em conceitos da ótica geométrica, chamados de Métodos de Acústica Geométrica, e os que buscam solucionar a “equação

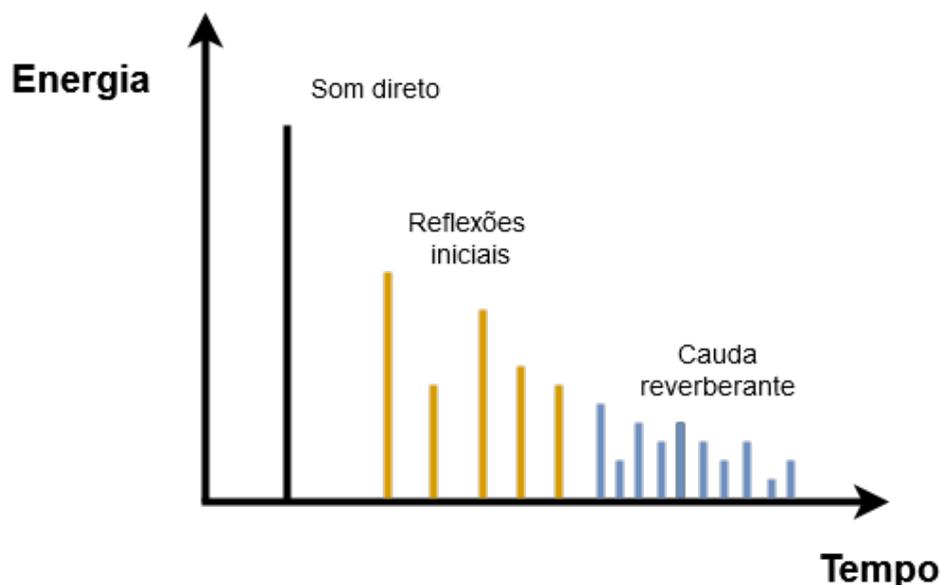


Figura 1.1: Partes de uma resposta ao impulso típica de salas.

da onda”, ou de Helmholtz [1], através da discretização espacial e temporal do problema. A acústica geométrica é utilizada principalmente no Método das Imagens e no Método de Traçado de Raios, enquanto a solução da equação da onda é utilizada nos métodos de Elementos Finitos (FEM), dos Elementos de Contorno (BEM) e das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD).

No método do Traçado de Raios tradicional [2] os fenômenos ondulatórios de difração e refração – presentes na propagação sonora – são desconsiderados. As ondas sonoras são tratadas como raios que, ao serem lançados da fonte, perdem energia ao longo do percurso. Esta perda se dá pela absorção do ar ou ainda pela interação com uma determinada superfície que, além do decaimento energético, provoca reflexão do raio. Dessa forma, é possível construir as respostas ao impulso pela coleta de raios nos receptores. Essa resposta pode ser dividida em duas partes, correspondentes às primeiras reflexões, compostas pelos raios que refletiram poucas vezes e atingiram o receptor, e à *Cauda Reverberante*, constituída por uma elevada concentração de raios de baixa energia que refletiram centenas de vezes dentro do ambiente. A Figura 1.1 exemplifica essas partes da IR.

Apesar de sua simplicidade e da eficiência computacional, o método do Traçado de Raios é altamente dependente da quantidade de raios acústicos lançados pelas fontes sonoras. Se essa quantidade não satisfizer determinadas condições, o método falha em caracterizar corretamente a energia da cauda reverberante da RIR. Isso ocorre devido à baixa probabilidade de os raios atingirem o receptor para tempos (ou distâncias) de propagação muito grandes. Depois de um determinado instante de tempo, que pode ser determinado teoricamente, a IR simulada deixa de ser uma

aproximação válida.

Obter uma resposta confiável da cauda reverberante pelo Traçado de Raios pode ser impraticável devido ao tempo de simulação necessário para propagar uma quantidade muito elevada de raios (da ordem de 10^6). Essa desvantagem é capaz de inviabilizar a aplicação deste método em ambientes reverberantes, uma vez que o resultado da simulação não representaria corretamente a realidade física para toda duração da resposta ao impulso.

Desde 2014 o simulador acústico BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*) [3], baseado na acústica geométrica, vem sendo desenvolvido na Universidade Federal do Rio de Janeiro. O simulador BRASS utiliza o método de traçado de raios com algumas modificações, que visam melhorias na identificação das primeiras reflexões através do agrupamento de raios que pertencem à mesma frente de onda. Contudo, apesar de resultar em uma estimativa mais precisa dessa parcela inicial da resposta ao impulso, a geração da cauda reverberante ainda é realizada da forma tradicional, coletando milhares de raios e suas centenas de reflexões de acordo com as características de absorção do ambiente. Esse processo é demorado e pode ser substituído pela síntese de uma cauda reverberante com características temporais, espectrais e de decaimento semelhantes às da cauda obtida pelo processo tradicional, evitando também erros de estimativa de nível de energia inerentes ao próprio método do traçado de raios.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é estudar e implementar um método alternativo para a determinação da parte final da resposta ao impulso (conhecida como cauda reverberante), que possa ser combinado com os resultados obtidos pelo método de traçado de raio para as primeiras reflexões. No método proposto, a cauda reverberante é estimada através da modelagem de um ruído que possui características de decaimento temporal e espectral semelhantes às da resposta ao impulso medida.

Dessa forma, é importante analisar os tipos de ruídos a serem utilizados na simulação acústica e na construção de respostas impulsivas, de modo que as suas características sejam as mais próximas das observadas em caudas reverberantes medidas.

1.3 Metodologia

Inicialmente, as primeiras reflexões da resposta ao impulso são calculadas pelo método do traçado de raios, utilizando o simulador acústico BRASS. Em seguida, essas reflexões são mescladas a um sinal aleatório, cujas primeiras amostras devem ter

energia semelhante à da parte final da parcela correspondente às primeiras reflexões, e possuir decaimento de energia próximo ao da cauda original.

A construção da cauda reverberante será dada através da síntese de ruídos estacionários, aos quais serão aplicadas funções de decaimento em cada banda de oitava, que correspondam ao observado nos casos reais. Dessa forma, a síntese dessa parte final da resposta ao impulso fica computacionalmente menos custosa do que o seu cálculo pelo método do traçado de raios.

Serão investigados os efeitos da aplicação de diferentes tipos de ruído, tais como Gaussiano, Rosa e Velvet [4], considerando suas características estatísticas e energéticas, bem como critérios para determinação das taxas de decaimento por bandas de oitavas. Como o foco desse trabalho é a síntese de ruídos que representem adequadamente a cauda reverberante, e não a determinação "cega" do decaimento da energia da resposta ao impulso, que depende de diversas características do ambiente e de absorção do ar, serão apenas analisados modelos para extrair de respostas medidas essas taxas de decaimento por banda.

A determinação do tipo de ruído mais adequado para ser combinado com as primeiras amostras obtidas pelo traçado de raios será feita através da comparação entre respostas impulsivas reais (medidas) e simuladas. Será realizada uma comparação objetiva, avaliando-se os erros das amostras e as diferenças entre os parâmetros de qualidade acústicas derivados das respostas medidas e das simuladas.

1.4 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 1 foi apresentada uma introdução ao tema dessa dissertação, enquanto que o ferramental teórico necessário para desenvolver e interpretar o método proposto é descrito no Capítulo 2, onde o trabalho desenvolvido é também colocado em perspectiva frente a outras publicações acadêmicas.

O Capítulo 3 contém uma descrição do método de síntese da cauda reverberante desenvolvido, com os principais modelos estatísticos empregados. Os resultados de simulações gerados com o método proposto são comparados com medições de respostas ao impulso reais, sendo o melhor modelo determinado. No Capítulo 4 a metodologia do simulador resultante desse trabalho é apresentada e no Capítulo 5 suas estimativas são avaliadas para outros ambientes.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Os fenômenos físicos presentes na propagação sonora são parte fundamental de um simulador acústico. As equações que regem esses fenômenos são descritas brevemente e as características principais de um simulador acústico são apresentadas.

O método do Traçado de Raios – por ser uma parte relevante da técnica de simulação proposta – é descrito em maiores detalhes.

A síntese da cauda reverberante, por sua vez, utiliza técnicas estatísticas e de processamentos de sinais. A formulação matemática desses conceitos é apresentada nesse capítulo.

2.1 Propagação Sonora

Uma fonte sonora irradia energia através de um determinado meio que, na aplicação considerada nesse trabalho, é o ar. Ao longo do percurso, as partículas do ar vibram em torno da sua posição média devido às variações de pressão. As duas grandezas fundamentais para caracterizar a onda sonora são a *pressão do ar* e a *velocidade* com que suas partículas se deslocam em torno da posição inicial. Em conjunto, essas duas grandezas determinam a intensidade e a frequência do som a uma determinada distância da fonte [1, 5].

Aplicando os princípios de conservação de movimento [1, 5], tem-se que

$$-\nabla(p) = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (2.1)$$

onde p é a pressão, ρ_0 é a densidade estática do ar e v é a velocidade.

Tratando o ar como um gás ideal expressamos, a velocidade das partículas como [1, 5]

$$-\nabla \vec{v} = \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2.2)$$

onde c é a velocidade do som no ar.

Combinando as Eqs. (2.1) e (2.2) chegamos na *equação de onda*, dada por [1, 5]

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (2.3)$$

Em teoria, a Eq. (2.3) é capaz de descrever qualquer tipo de onda. Entretanto, salvo alguns casos bastante específicos, encontrar uma solução analítica para a Eq. (2.3) é impraticável.

Considerando uma fonte pontual e uma frente de onda esférica, é possível obter o seguinte resultado para a pressão sonora num determinado ponto:

$$p(r, t) = \frac{\rho_0}{4\pi r} \frac{\partial Q}{\partial t} \left(t - \frac{r}{c} \right), \quad (2.4)$$

onde r é a distância do ponto de medição à fonte sonora e Q é uma função que descreve a mudança de pressão uniforme em todas as direções e com velocidade c , tomando como referência uma fonte localizada em $x = 0$. A energia da frente de onda é inversamente proporcional ao quadrado da distância, ou seja, r^{-2} .

A intensidade do som, I , descreve a energia que atravessa uma área A no intervalo de 1s. As Eqs. (2.1) e (2.3) permitem escrever:

$$I = p\dot{v} = \frac{1}{T} \int_0^T p\dot{v} dt. \quad (2.5)$$

A partir da intensidade I , definimos a potência P como

$$P = \int_A I dA, \quad (2.6)$$

que, para a onda esférica, é igual a

$$P = \frac{\rho_0 \omega^2 \hat{Q}}{8\pi c}, \quad (2.7)$$

resultando em

$$I = |I| = \frac{P}{4\pi r^2}. \quad (2.8)$$

Essa grandeza é também proporcional à r^{-2} . Além disso, se considerarmos a atenuação no ar, causada pela viscosidade característica, condução de calor e relaxação térmica das moléculas de oxigênio e nitrogênio temos

$$I(r) = I_0 e^{-(mr)}, \quad (2.9)$$

onde o parâmetro m quantifica a dissipação energética causada pela propagação da onda no ar. Essa dissipação depende tanto da frequência da fonte sonora quanto da

umidade, da temperatura e da pressão atmosférica [1, 5].

Os resultados apresentados consideram um fonte pontual o que, na prática, não existe. Por outro lado, se a fonte for pequena em relação ao comprimento de onda emitido, uma aproximação consistente para o campo livre é alcançada com a expressão derivada acima. No campo livre, ou seja, livre de reflexões, a propagação da onda não sofre interferências do meio ou de obstáculos.

2.1.1 Reflexão

Uma frente de onda planar ao encontrar com uma superfície infinita e uniforme, sofre reflexão, de acordo com a lei de *Snell*, e perde energia. Ou seja, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Basicamente, a onda, ao se chocar com uma superfície, sofre uma mudança de direção, de amplitude e de fase [1, 5]. Dessa forma, as ondas de pressão incidente (p_i) e refletida (p_r) na parede são dadas, respectivamente, por

$$p_i(x, y, t) = \hat{p} e^{j(\omega t - kx \cos(\theta) - ky \sin \theta)} \quad (2.10)$$

e

$$p_r(x, y, t) = \hat{p} \underline{R} e^{j(\omega t - kx \cos(\theta) - ky \sin \theta)}. \quad (2.11)$$

A variável θ é o ângulo de reflexão, e \underline{R} é o fator de reflexão dado por

$$\underline{R} = \frac{p_r}{p_i} = \frac{\underline{Z} \cos(\theta) - Z_0}{\underline{Z} \cos(\theta) + Z_0}, \quad (2.12)$$

onde $Z_0 = \rho_0 c$ é a impedância característica do ar e \underline{Z} é a impedância da superfície considerada. A impedância da superfície é definida como a razão entre a pressão do ar incidente e a componente normal da velocidade do som no ponto de incidência.

Algumas superfícies, chamadas de localmente reativas, possuem impedâncias constantes com relação ao ângulo de incidência da onda. Nesse caso, a intensidade da onda refletida nada mais é do que a intensidade da onda incidente multiplicada por um valor constante, igual à grandeza $|\underline{R}|^2$ característica da superfície.

Definindo o fator de absorção α como a razão entre a energia absorvida (dissipada) e a energia incidente da onda, ou seja,

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{|p_i|^2 - |p_r|^2}{|p_i|^2} = 1 - |\underline{R}|^2 \\ &= \frac{4 \operatorname{Re}(\psi) \cos(\theta)}{1 + 2 \operatorname{Re}(\psi) \cos(\theta) + |\psi|^2 \cos^2(\theta)}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde $\psi = \frac{\underline{Z}}{Z_0}$, é possível relacionar a intensidade da onda incidente I_i com a intensi-

dade da onda refletida I_r pela expressão:

$$I_r = (1 - \alpha)I_i. \quad (2.14)$$

Deve-se observar que o valor de α depende do ângulo de incidência θ .

2.2 Resposta ao Impulso de Salas

Existem diversos percursos que as ondas sonoras emitidas por uma determinada fonte podem realizar até chegar ao receptor. No percurso, as ondas perdem energia ,devido à colisão com as partículas do ar e a interação com o ambiente, e chegam em diferentes instantes de tempo no receptor, seja pelo fenômeno de reflexão, difração ou difusão.

O padrão com que essas “versões” da onda original chegam atrasadas e atenuadas é característico da própria sala. A quantidade de energia que chega no receptor em cada instante de tempo depende principalmente da geometria e do material de revestimento da sala. Contudo, outros fatores podem influenciar nessa quantidade de energia captada pelo receptor, tais como a distribuição espacial da energia emitida pela fonte e o padrão de captação de energia do receptor (omnidirecional, cardioide ou outro padrão).

O série temporal que chega ao receptor por uma fonte sonora é a resposta ao impulso (IR, do inglês *Impulse Response*) associada àquele par fonte/receptor. A resposta impulsiva da sala (RIR, do inglês *Room Impulse Response*) é obtida tomando-se a média das IRs de uma quantidade considerável de combinações entre fonte e receptor. Tanto a IR quanto a RIR podem ser medidas em pressão ou energia. Neste trabalho são considerados apenas os valores de energia da IR e da RIR.

A partir das IRs ou da RIR, a maior parte dos parâmetros relativos à qualidade acústica podem ser estimados [6]. Um exemplo típico de uma RIR é apresentado na Fig. 1.1. Usualmente, divide-se a RIR em três partes, correspondentes ao som direto, às reflexões iniciais (ou “primeiras reflexões”) e à cauda reverberante.

A parte correspondente ao som direto é identificada pelo primeiro impulso que chega ao receptor, sendo também o que apresenta maior energia. Está, em geral, associado à trajetória sem obstáculos do som a partir da fonte até o receptor. A onda, nesta etapa, não sofre nenhuma reflexão e perde energia apenas devido à absorção por partículas do ar.

A parte correspondente às reflexões iniciais representa o caminho das primeiras reflexões do sinal da fonte em paredes e outros objetos e/ou pessoas até chegar no receptor. Essas reflexões são indistinguíveis do som direto pela audição humana [5]. Essa parte da RIR está associada à percepção da posição, tamanho e intensidade

da fonte pelo receptor.

Entre 50 ms e 80 ms após o som direto, aproximadamente, a cauda reverberante emerge. Nessa parte, o campo sonoro torna-se bastante difuso sendo praticamente impossível identificar as reflexões como eventos individuais [5, 6]. As reflexões de ordem elevada tendem a ser mais difusas, se comparadas às reflexões iniciais. Assim, qualquer “caminho” fonte-receptor tende a se tornar predominantemente estatístico [4–7].

Ao contrário das outras etapas, a cauda reverberante é praticamente independente da posição da fonte em relação ao receptor e está diretamente ligada às características geométricas da sala. A reverberação compreende atributos como o volume, a forma da sala e seus materiais que, em conjunto, qualificam a acústica do ambiente.

2.2.1 Síntese da Cauda Reverberante

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é reduzir o custo computacional da simulação da cauda reverberante no método do Traçado de Raios (vide Seção 2.3.1) e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da simulação acústica de salas.

Na literatura, existem diversas técnicas que podem ser empregadas na síntese da cauda reverberante. Os trabalhos apresentados em [4, 7] descrevem as técnicas mais conhecidas e largamente utilizadas. Em sua grande maioria, as soluções propostas consistem em implementar filtros digitais e estruturas computacionalmente eficientes. Contudo, como tais implementações visam o processamento em tempo real, a estrutura energética e temporal da cauda reverberante nem sempre possui as mesmas características das caudas reais.

Em [8], é apresentada uma abordagem semelhante à utilizada nesta dissertação, que consiste na definição de um modelo estatístico para a cauda reverberante de modo a melhorar o resultado de um dos métodos de simulação acústica. Entretanto, não é avaliada a qualidade dos resultados das simulações através de comparações objetivas, ou mesmo subjetivas. Além disso, não são apresentados critérios objetivos de como mesclar a cauda reverberante com a resposta simulada pelo método original. Em [9], por sua vez, o foco consiste em avaliar os resultados de um modelo proposto por meio da qualidade da audibilização e da percepção espacial das simulações.

2.3 Simulação Acústica de Salas

Em geral, métodos de simulação acústica são utilizados para encontrar a IR de uma determinada sala e, a partir dela, determinar os parâmetros acústicos [1, 6] ou produzir resultados de audibilização [1, 10]. Devido à grande quantidade de operações realizadas nesse processo, todos os métodos de simulação empregam computadores

com alta velocidade de processamento.

Os métodos de simulação, em sua grande maioria, empregam uma, ou uma combinação, das seguintes abordagens: i) resolver a equação de onda; ii) assumir as hipóteses de acústica geométrica. No primeiro caso, as características geométricas da sala são incorporadas à equação de onda para que esta possa ser resolvida. No segundo, uma solução mais simples do problema é obtida, empregando-se uma formulação geométrica simplificada da propagação da onda.

Encontrar uma solução analítica para a equação de onda na maioria dos casos é impraticável, pois os problemas são demasiadamente complexos. O método dos elementos finitos, de um modo geral, corresponde à discretização dos domínios do problema, transformando cada equação diferencial em diversos sistemas lineares. Mesmo com o auxílio de métodos numéricos, resolver a equação de onda pode ser inviável. Pode-se demorar um tempo proibitivo – dependendo da aplicação – para se chegar a uma resposta confiável. Assim, como alternativa, simplifica-se o problema desconsiderando alguns dos fenômenos físicos presentes nas ondas sonoras.

2.3.1 Acústica Geométrica de Salas

Na acústica geométrica (GA, do inglês *Geometrical Acoustics*), assume-se que o som se propaga em raios. Essa hipótese simplifica consideravelmente o cálculo das IRs. Para altas frequências, nas quais o comprimento de onda do som é pequeno quando comparado às dimensões da sala, não observa-se uma grande perda de precisão com essa abordagem. Por outro lado, para frequências mais baixas, os fenômenos de onda tendem a predominar. Essa limitação foi observada em [11].

As técnicas de GA começaram a ser aplicadas no final da década de 1950 [12]. Nesses trabalhos, utilizou-se a propagação em raios das ondas sonoras para se medir o Livre Caminho Médio (MFP, do inglês *Mean Free Path*). O MFP avalia a distância média que um raio viaja entre sucessivas reflexões em uma dada geometria e está relacionado às características acústicas de uma determinada sala, por exemplo, ao tempo de reverberação inicial [5]. Em [2], dispondo de computadores mais sofisticados, foi apresentado o primeiro método no qual a RIR é calculada levando-se em consideração a posição do receptor. Este cálculo foi feito via traçado de raios.

As técnicas de GA, das mais simples às mais sofisticadas, empregam dois modelos fundamentais, um para a propagação sonora e outro para a reflexão. A base matemática necessária para desenvolver praticamente qualquer um dos métodos de GA pode ser encontrada em [1, 6].

Para a propagação sonora, podem ser empregados modelos baseados em energia ou em pressão do som. As Eqs. (2.5) e (2.1), respectivamente, apresentam modelos para estes dois fenômenos.

No modelo de propagação baseado em energia, desconsidera-se a informação de atrasos das ondas sonoras, ou seja, as reflexões não alteram a fase da onda, somente sua energia. Dessa forma, ao calcular a contribuição energética de todos os raios, basta somar suas amplitudes, sendo ignorados os efeitos de interferência, os quais dependem da informação da fase. Os efeitos da perda de energia nas diferentes faixas de frequência são analisados separadamente. Por se tratarem de modelos lineares, ao final, somam-se os resultados da modelagem por faixa de frequência para obter a resposta completa em banda larga. Como resultado final temos um Ecograma [1, 5], que corresponde a uma série temporal, $p^2(t)$, em que cada valor indica a energia que atingiu o receptor num determinado instante de tempo durante a simulação. A IR pode ser facilmente obtida incluindo um passo intermediário neste processo. Antes de somar as contribuições de cada faixa de frequência basta extrair a raiz quadrada dos valores de energia [1].

Método das Imagens

O Método das Imagens, na sua versão mais simples, desconsidera o espalhamento que eventualmente ocorre quando uma onda sonora é refletida [1, 5, 6]. Assim, durante a reflexão, assume-se que o ângulo do raio incidente é idêntico ao ângulo do raio refletido em relação ao vetor normal a superfície e ambos os raios pertencem ao mesmo plano, como indicado na Fig. 2.1.

Em notação vetorial, sendo \mathbf{u}_r e \mathbf{u}_i os vetores correspondentes aos raios refletido e incidente, respectivamente, e \mathbf{n} o vetor unitário perpendicular à superfície de reflexão, tem-se

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_i - 2 \langle \mathbf{u}_i, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n}, \quad (2.15)$$

onde $\langle \cdot, \cdot \rangle$ representa o produto interno de dois vetores.

O conceito de ponto “Imagem”, ilustrado na Fig. 2.2, é empregado de maneira recorrente nesta técnica de simulação. Nessa figura, são considerados um receptor B e duas fontes, uma real (A) e uma virtual (A'), sendo A' a imagem de A em relação ao plano de reflexão. A reflexão do som na parede é “percebido” por B como uma

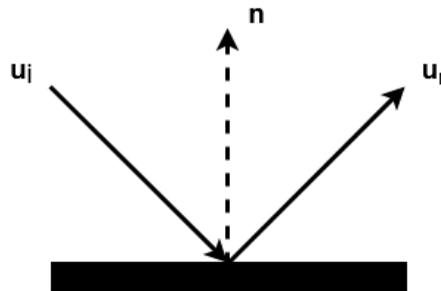


Figura 2.1: Reflexão sonora em um plano.

frente de onda cuja fonte é A' .

Dessa forma, todos os caminhos que ligam a fonte ao receptor são procurados pelo método. A imagem da fonte associada a cada caminho é determinada para cada reflexão e esse processo é repetido até a ordem de reflexão (número de reflexões) desejada. Neste momento, o tempo decorrido do início ao fim do percurso, em conjunto com a energia final, são registrados. O ecograma associado ao sistema fonte/receptor é o resultado desse processo.

O Método das Imagens, nesse sentido, é exato, ou seja, considera todos os caminhos da fonte ao receptor. Entretanto, o número de imagens cresce substancialmente em função do número de reflexões, obedecendo à seguinte regra [5]:

$$v(i_0) = N \frac{(N - 1)^{i_0} - 1}{N - 2}, \quad (2.16)$$

onde N é o número de superfícies da sala e $v(i_0)$ é o número de imagens geradas até a reflexão de ordem i_0 .

Em salas com estruturas geométricas simples, muitas dessas imagens são redundantes. Ou seja, muitas imagens acabam na mesma posição, reduzindo, consequentemente, o número de operações necessárias para se determinar a RIR. Na maioria das aplicações práticas, entretanto, dificilmente pode-se recorrer a esse tipo de simplificação. Assim, o Método das Imagens pode se tornar proibitivo devido ao elevado custo computacional associado ao cálculo de todas as imagens, principalmente na parte da cauda reverberante.

Traçado de Raios

Em [2, 12] foram apresentados os conceitos fundamentais do método do traçado de raios. Enquanto [12] é um dos primeiros trabalhos em que o traçado de raios foi empregado para o cálculo do MFP em ambientes retangulares, [2] contém uma descrição de como obter a resposta de energia \times tempo em espaços tridimensionais, fundamental para o cálculo da RIR.

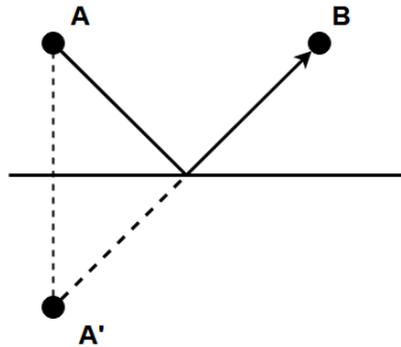


Figura 2.2: Ilustração do conceito de Imagem.

Ao contrário do Método das Imagens, o Traçado de Raios é um método estocástico. Ou seja, é feita uma amostragem dos possíveis caminhos existentes entre a fonte e o receptor, ao invés de avaliá-los em sua totalidade. O “lançamento” de raios da fonte ao receptor constitui um dos princípios básicos dessa técnica. Cada raio parte do receptor com uma direção aleatória e uma intensidade.

Em algumas implementações do método, um número aleatório é sorteado para determinar a direção do raio. Essa distribuição estatística depende da fonte considerada. Por exemplo, para uma fonte omnidirecional seria apropriado sortear um número no intervalo $[0, 360)$ para determinar o ângulo de azimute do raio. A intensidade de cada raio, por sua vez, é proporcional à intensidade da fonte. Para uma fonte de energia E em uma simulação com N raios, cada raio possui energia E/N .

Durante sua propagação, o raio perde energia ao atingir uma superfície e ao se propagar pelo ar. A perda energética depende da frequência considerada e dos materiais em que o raio refletiu. Acompanha-se a propagação do raio enquanto algum critério de parada, definido antes do início da simulação, não for atingido. Alguns critérios usualmente empregados são: energia mínima, número máximo de reflexões e tempo máximo de propagação. Adotando-se o primeiro critério, interrompe-se a propagação quando o a energia do raio atingir um valor demasiadamente pequeno ou proporcional a sua energia inicial (-60 dB, por exemplo). Com o segundo critério, o processo é finalizado quando o número de reflexões de um raio, ao longo do seu percurso, ultrapassar um certo limiar. Com o terceiro critério, encerramos o percurso do raio quando um determinado intervalo de tempo é alcançado, mesmo que os outros critérios indiquem a continuidade da propagação .

Para cada raio, registramos o instante de tempo em que ele atingiu o receptor, bem como a intensidade associada. Ao final da simulação temos uma estrutura que nos fornece a energia recebida para um certo instante de tempo e uma certa faixa de frequência, conhecida como Ecograma.

Para calcular a IR da sala, cada valor de energia no domínio tempo-frequência deve ser convertido em pressão e, em seguida, a resposta associada a cada faixa de frequência deve gerar uma componente no tempo, empregando-se a resposta ao impulso do filtro correspondente. Ao final, as respostas de todas as faixas de frequência são somadas, chegando assim a IR estimada. A Fig. 2.3 ilustra esses passos.

2.4 Parâmetros de Qualidade Acústica

Sabine foi um dos primeiros pesquisadores a investigar de forma sistemática a qualidade acústica de salas. Na série de trabalhos publicados entre 1900 e 1915 [13], foi apresentado um estudo sobre o tempo de reverberação de uma sala, bem como sobre

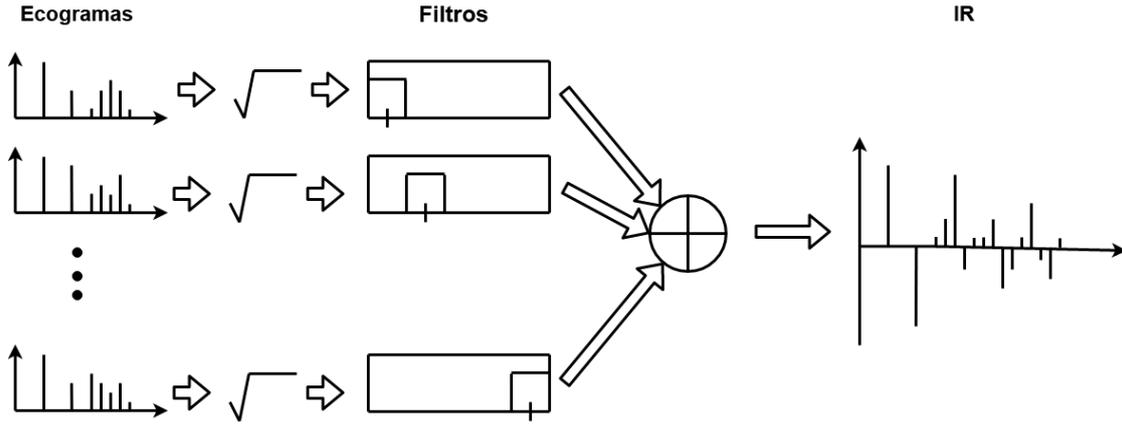


Figura 2.3: Etapas do cálculo da IR a partir do ecograma.

a absorção sonora de diferentes materiais e os seus efeitos no tempo de reverberação [14]. O tempo de reverberação, definido por Sabine e representado por T_{60} , mede o tempo necessário para que a pressão sonora decaia 60 dB em relação ao nível que tinha quando a fonte estava ligada em regime permanente.

Outro parâmetro, proposto por Meyer [15], diz respeito à difusão do som. Nesse trabalho é apresentada uma metodologia para calcular o parâmetro atualmente chamado de “clareza ou definição” e representado por D_{50} . A definição, ao contrário do T_{60} , mede não apenas o decaimento energético da sala, mas também a inteligibilidade do som percebido pelo receptor. Essa percepção é calculada tomando como referência os primeiros 50 ms ou 80 ms, após o som emitido chegar no receptor.

Em [16], buscando sistematizar o projeto acústico de salas, Beranek mediu os parâmetros acústicos de diversas salas e, combinando com percepções subjetivas, registrou em quais circunstâncias uma sala de concertos possuía uma acústica adequada. Diversos estudos posteriores utilizaram o livro de Beranek como referência.

Neste trabalho utilizaremos três parâmetros para avaliar a IR simulada: Tempo de Reverberação, Clareza e Definição. Em [17], Schroeder mostrou como calcular o Tempo de Reverberação de maneira eficiente, empregando apenas a IR da sala. Em contraste com as técnicas da época, o método de Schroeder requer apenas uma medição da IR da sala. As outras técnicas consistiam em calcular a média dos tempos de reverberação obtidos pelas medições de várias IRs.

A Clareza, C_{80} , e a Definição, D_{50} , de acordo com a norma ISO 3382 [18, 19], são calculadas a partir das seguintes equações:

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (2.17)$$

e

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt}, \quad (2.18)$$

onde $p(t)$ é a pressão instantânea de uma IR, com t em milisegundos.

De maneira análoga às Equações 2.17 e 2.18 é possível calcular a clareza e a definição tomando como referência os instantes de 50ms e 80ms, respectivamente. Essas duas grandezas, C_{50} e D_{80} , são calculadas da seguinte forma

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (2.19)$$

e

$$D_{80} = \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt}, \quad (2.20)$$

onde, mais uma vez, $p(t)$ é a pressão instantânea de uma IR, com t em milisegundos.

Outra grandeza utilizada neste trabalho é o tempo central, T_C , definido como o centro de massa da energia da IR ao longo do tempo:

$$T_C = \frac{\int_0^{+\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{+\infty} p^2(t) dt}, \quad (2.21)$$

onde $p(t)$ é a pressão instantânea da IR.

2.5 Sinais e Sistemas Lineares

Define-se um sistema como um operador que mapeia uma função em outra. Para que um determinado sistema $H\{\cdot\}$ seja linear, a seguinte propriedade deve ser satisfeita [20]:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= H\{x_1(t)\}, \\ y_2(t) &= H\{x_2(t)\} \\ y_1(t) + y_2(t) &= H\{\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)\} \implies \\ y_1(t) + y_2(t) &= \alpha H\{x_1(t)\} + \beta H\{x_2(t)\} \end{aligned} \quad (2.22)$$

onde $\alpha \in \mathbb{R}$ e $\beta \in \mathbb{R}$.

Um sistema $H\{\cdot\}$ é invariante no tempo quando satisfizer [20]

$$y_1(t) = H\{x_1(t)\}, y_2(t) = H\{x_1(t + \delta)\} \implies y_2(t) = y_1(t + \delta), \quad (2.23)$$

onde $\delta \in \mathbb{R}$.

Usualmente, em simulação acústica, os ambientes de estudo são considerados sistemas lineares e invariantes no tempo (LTI, do inglês *Linear Time Invariant*) [20]. A entrada do sistema é o sinal emitido pela fonte, enquanto que a saída é o sinal que chega no receptor. O efeito que a propagação na sala causa no sinal emitido corresponde ao operador LTI. Considerando que a fonte e o receptor estão em posições fixas e que a estrutura geométrica não muda durante a propagação sonora, um sistema LTI mostra-se um modelo apropriado para descrever matematicamente a acústica de uma determinada sala.

Além das Eqs. (2.22) e (2.23) pode-se caracterizar completamente um sistema LTI pela sua resposta ao impulso $h(t)$. A resposta $y(t)$ para qualquer entrada $x(t)$ pode ser obtida a partir do operador de convolução $\{\star\}$, definido como

$$\begin{aligned} y(t) &= H\{x(t)\} = x(t) \star h(t) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (2.24)$$

No contexto deste trabalho, $h(t)$ é a RIR de uma determinada sala.

As técnicas de simulação acústica, devido à grande quantidade de operações necessárias, são, quase em sua totalidade, implementadas por processadores digitais (DSPs, do inglês *Digital Signal Processor*) ou por computadores; assim, serão apresentados apenas modelos para sinais discretos no domínio do tempo. Ou seja, ao invés de um domínio contínuo, com $t \in \mathbb{R}$, teremos um domínio discreto, com $n \in \mathbb{Z}$. Podemos converter um sinal do tempo contínuo $x(t)$ para o tempo discreto $x[n]$ através da amostragem

$$x(n) = x\left(\frac{t}{T_s}\right), \quad (2.25)$$

sendo T_s o período de amostragem e $F_s = \frac{1}{T_s}$ a frequência de amostragem [20]. Para que não haja perda de informação entre esses dois domínios, a frequência de amostragem deve ser suficientemente alta, ou seja, F_s deve obedecer ao critério de Nyquist [20]. Sem essa restrição não há como garantir um mapeamento único entre os sinais contínuo e discreto.

A operação de convolução no tempo discreto é definida como

$$y(n) = x(n) \star h(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k)h(n-k), \quad (2.26)$$

onde $h[n]$ é a resposta ao impulso do sistema discreto [20].

Além da resposta ao impulso, podemos representar um sistema a partir de sua função de transferência [20]. A função de transferência é definida como a transformada Z [20] da resposta ao impulso, dada por

$$H(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)z^{-n}. \quad (2.27)$$

Já a resposta em frequência de um sistema é definida como a transformada de Fourier [20] da resposta ao impulso, dada por,

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)e^{-j\omega n}. \quad (2.28)$$

Dizemos que a função de transferência para $z = e^{j\omega}$ é a representação no domínio da frequência da resposta ao impulso que, em contrapartida, encontra-se no domínio do tempo. Para retornar ao domínio do tempo, temos a transformada inversa de Fourier, cuja definição é

$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} H(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega \quad (2.29)$$

Ao passar a entrada de um sistema LTI para o domínio da frequência, via transformada de Fourier, podemos expressar a saída desse sistema como [20]

$$H(e^{j\omega}) = \frac{Y(e^{j\omega})}{X(e^{j\omega})}, \quad (2.30)$$

onde $Y(e^{j\omega})$ é a transformada de Fourier da saída correspondente à entrada $X(e^{j\omega})$. A Eq. (2.30) mostra que, no domínio da frequência, o operador de convolução torna-se um produto entre $H(e^{j\omega})$ e $X(e^{j\omega})$.

A transformada de Fourier é implementada computacionalmente pela transformada discreta de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*), definida

como [20]

$$H[k] = \sum_{n=0}^{L-1} h[n] e^{-j \frac{2k\pi n}{L}}, \quad (2.31)$$

onde L é o número de amostras disponíveis de $h(n)$.

A operação inversa da DFT é chamada de transformada discreta inversa de Fourier (IDFT, do inglês *Inverse Discrete Fourier Transform*) definida como [20]

$$h(n) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} H(k) e^{j \frac{2k\pi n}{L}} \quad (2.32)$$

Teoricamente, pode-se pensar na DFT como uma operação de amostragem uniforme da transformada de Fourier [20], onde

$$\begin{aligned} H[k] &= H(e^{j\omega_k}), \\ \omega_k &= \frac{2k\pi}{N}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

A Eq. (2.33) mostra que a resolução espectral da DFT está limitada à quantidade de amostras disponíveis do sinal analisado [20, 21].

As Eqs. (2.28) e (2.31) são definidas para todos os instantes de tempo dos sinais considerados. O resultado dessas operações pode ser interpretado como uma “média” das componentes espectrais presentes no sinal no intervalo de tempo considerado. Dessa forma, se o espectro de um determinado sinal não for aproximadamente constante durante o intervalo de tempo considerado, a transformada de Fourier, por si só, não será capaz de representar apropriadamente esse comportamento. O seguinte sinal, conhecido como *Chirp*, é usado como exemplo para ilustrar esse fenômeno:

$$\begin{aligned} y(t) &= \cos(f_0 t^2), \\ 0 &\leq t \leq 0.5 \text{ s} \end{aligned} \quad (2.34)$$

onde $f_0 = 250$ Hz. O sinal *Chirp* da Eq. (2.34) é mostrado na Fig. 2.4, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. A transformada de Fourier desse sinal, quando calculada para todo o intervalo de tempo, não revela a variação linear da frequência com o tempo.

Como indicado na Eq. (2.9), as componentes espectrais do som sofrem perdas energéticas durante a sua propagação. Assim, embora a DFT seja uma técnica útil, é necessário empregar outra transformada para capturar essas mudanças. Uma possível solução para esse problema consiste em analisar o sinal em blocos de amostras [21], ou seja, a DFT é calculada para diferentes trechos do sinal que, quando

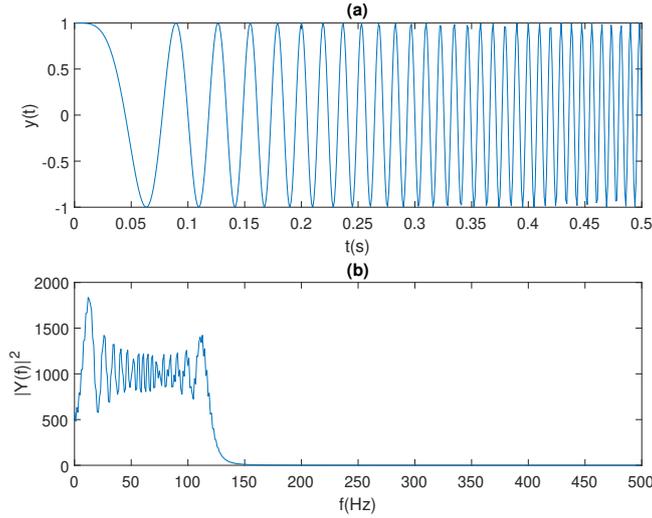


Figura 2.4: (a) Representação no domínio do tempo do sinal *Chirp* e (b) sua transformada de Fourier.

analisados em sequência, mostram a evolução energética para diferentes faixas de frequência ao longo do tempo.

Para este tipo de análise, define-se a transformada de Fourier dependente do tempo ou transformada de Fourier de tempo curto (STFT, do inglês *Short Time Fourier Transform*), dada por [21]

$$X[n, \omega] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} w[n+m]x[m]e^{-j\omega m}. \quad (2.35)$$

A função $w[n]$ é chamada de janela e delimita o trecho do sinal que está sendo analisado [21]. Existem diferentes funções janela que foram propostas na literatura, cada uma com características próprias [21]. A janela retangular, por exemplo, é definida como

$$w[n] = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 < n \leq N \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.36)$$

onde N é o tamanho da janela.

Calcular a transformada da Eq. (2.35) para uma quantidade infinita de valores de $\omega \in [-\pi, \pi]$ é impraticável. Assim, de maneira análoga à Eq. (2.33), ω é amostrado em intervalos uniformemente espaçados, calculando-se, assim, a DFT de cada bloco

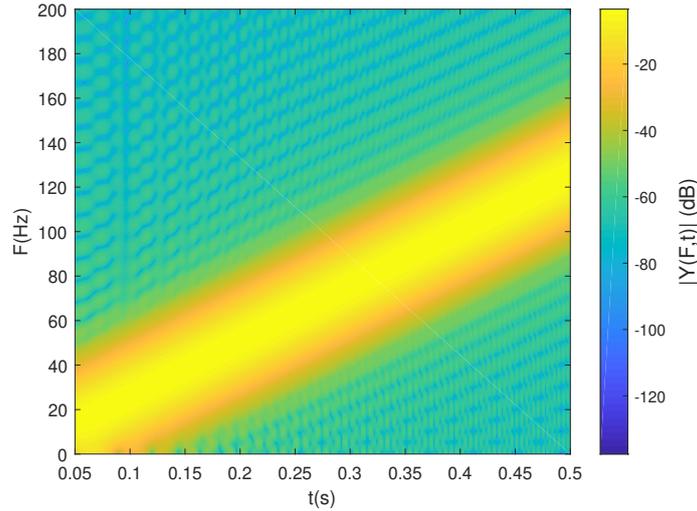


Figura 2.5: Espectrograma do sinal *Chirp*.

[21]:

$$X[n, k] = X[n, 2k\pi/N] = \sum_{m=0}^{L-1} x[n+m]w[m]e^{-j(2\pi k/N)m}, \quad (2.37)$$

$$0 \leq k \leq N-1.$$

Como exemplo da utilidade desta técnica, analisamos o sinal *Chirp*, definido na Eq. (2.34) e amostrado, usando a Eq. (2.37) com a janela retangular de tamanho $L = 250$ e uma sobreposição de 75% entre os blocos [21]. Na Fig. 2.5 mostramos o gráfico, conhecido como espectrograma, com o resultado desta análise. Neste caso, temos que a STFT da Eq. (2.37) fornece uma representação na frequência mais apropriada para o sinal *Chirp* do que a DFT.

2.6 Probabilidade, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos

O ferramental matemático da Teoria das Probabilidades é demasiado extenso. Neste trabalho, essas ferramentas são utilizadas para sintetizar a cauda reverberante de uma RIR. O escopo, dessa forma, é limitado à apresentação das principais distribuições utilizadas – em termos de suas funções de distribuição de probabilidade (pdf, *probability density function*) – operações matemáticas empregadas em suas análises e em como definir um processo estocástico – empregado na modelagem da cauda reverberante [22, 23].

Ao todo, serão utilizados seis processos estocásticos distintos na síntese da cauda reverberante. Quatro deles são gerados a partir de variáveis aleatórias com distri-

buições Gaussiana, Poisson, Uniforme e Bernoulli, e os outros dois correspondem ao ruído Rosa e ao ruído Velvet [24].

2.6.1 Média e Variância

As principais operações empregadas para analisar variáveis aleatórias neste trabalho são a média – ou valor esperado – e a variância. A média é definida pelo operador linear

$$E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx, \quad (2.38)$$

onde X é uma variável aleatória com pdf $f_X(x)$.

A variância de uma variável aleatória é definida como

$$E[(X - \bar{X})^2] = \sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{X})^2 f_X(x) dx, \quad (2.39)$$

$$\bar{X} = E[X].$$

Ao lidar com uma quantidade finita de amostras de uma variável aleatória X , a média e a variância devem ser estimadas utilizando-se estas amostras. Um estimador para a média é dado por

$$\hat{E}[X] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x_n, \quad (2.40)$$

onde x_n é um amostra da variável aleatória X . O valor resultante é denominado média amostral.

A variância pode ser estimada por

$$\hat{\sigma}_X^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^N (x_n - \hat{X})^2, \quad (2.41)$$

onde \hat{X} é a média amostral.

As propriedades estatísticas destes estimadores, que também são variáveis aleatórias, são descritas em detalhes em [22].

2.6.2 Distribuição Gaussiana

A distribuição Gaussiana possui a seguinte função densidade de probabilidade:

$$f_X(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}, \quad (2.42)$$

onde μ é a média da distribuição e σ^2 é a variância. Usualmente, o valor de μ é considerado 0.

Na Fig. 2.6 pode-se observar o efeito da variância na distribuição de duas formas: na primeira estão os valores sorteados de uma distribuição gaussiana ao longo do tempo, enquanto que na segunda estão os histogramas correspondentes. Para facilitar a visualização, apenas 100 valores foram exibidos no sorteio, enquanto que no cálculo do histograma foram utilizados 100.000 amostras.

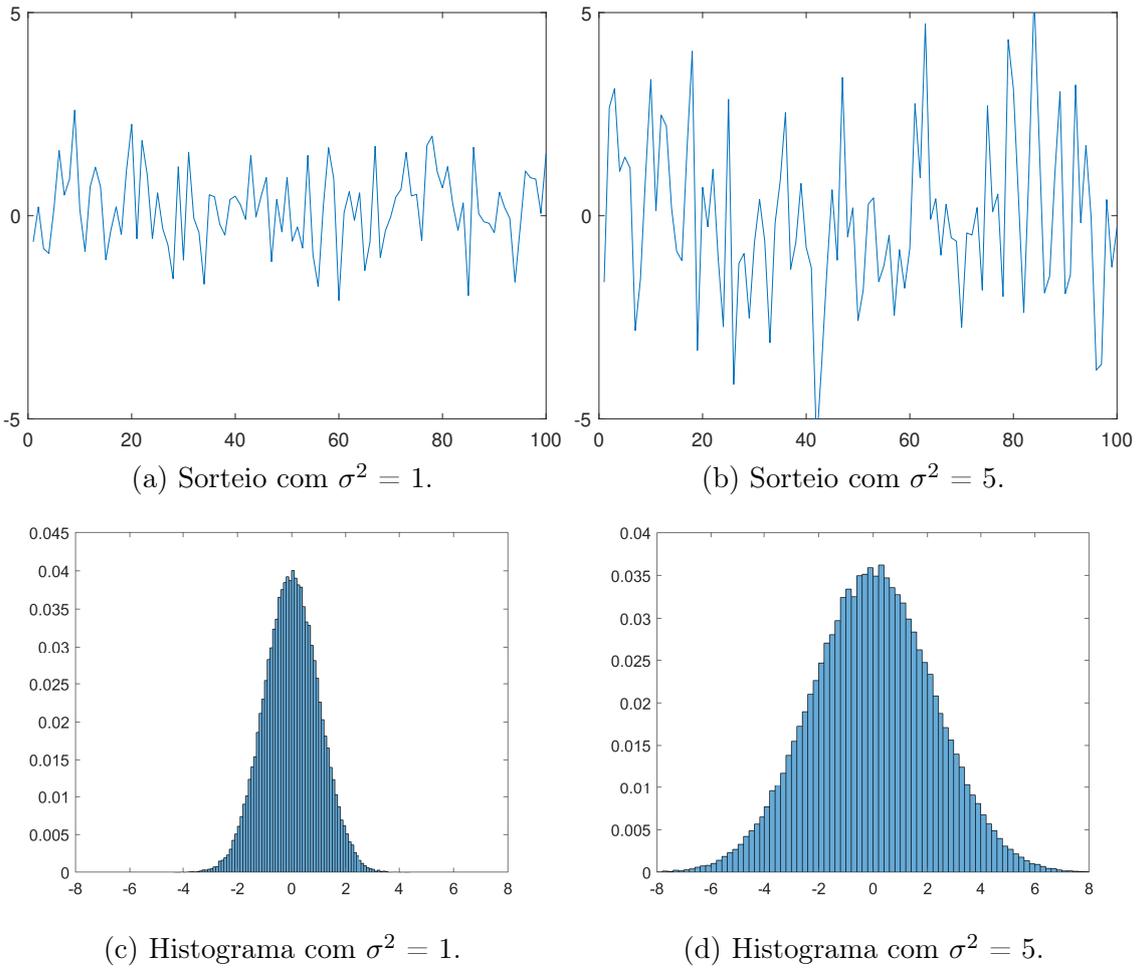


Figura 2.6: Sorteio de uma distribuição gaussiana com os respectivos histogramas para diferentes valores de σ^2 .

2.6.3 Distribuição de Poisson

Uma variável aleatória X com distribuição de Poisson possui a seguinte pdf:

$$f_X(x, \lambda) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}, \quad (2.43)$$

$x \in \mathcal{Z}$.

Ao contrário da distribuição gaussiana, a distribuição de Poisson possui apenas um parâmetro, λ , que indica a taxa de ocorrência por unidade medida. A média e a variância são obtidas utilizando a Eq. (2.43) nas Eqs. (2.38) e (2.39), respectivamente. O resultado dessas operações resultam em

$$E[X] = \sigma_X^2 = \lambda. \quad (2.44)$$

Na Fig. 2.7 está indicado o efeito de λ na distribuição em dois exemplos: sorteio de números aleatórios dessa distribuição e histograma associado. Os sorteios foram feitos com 100 amostras enquanto que no cálculo do histograma foram utilizadas 100.000.

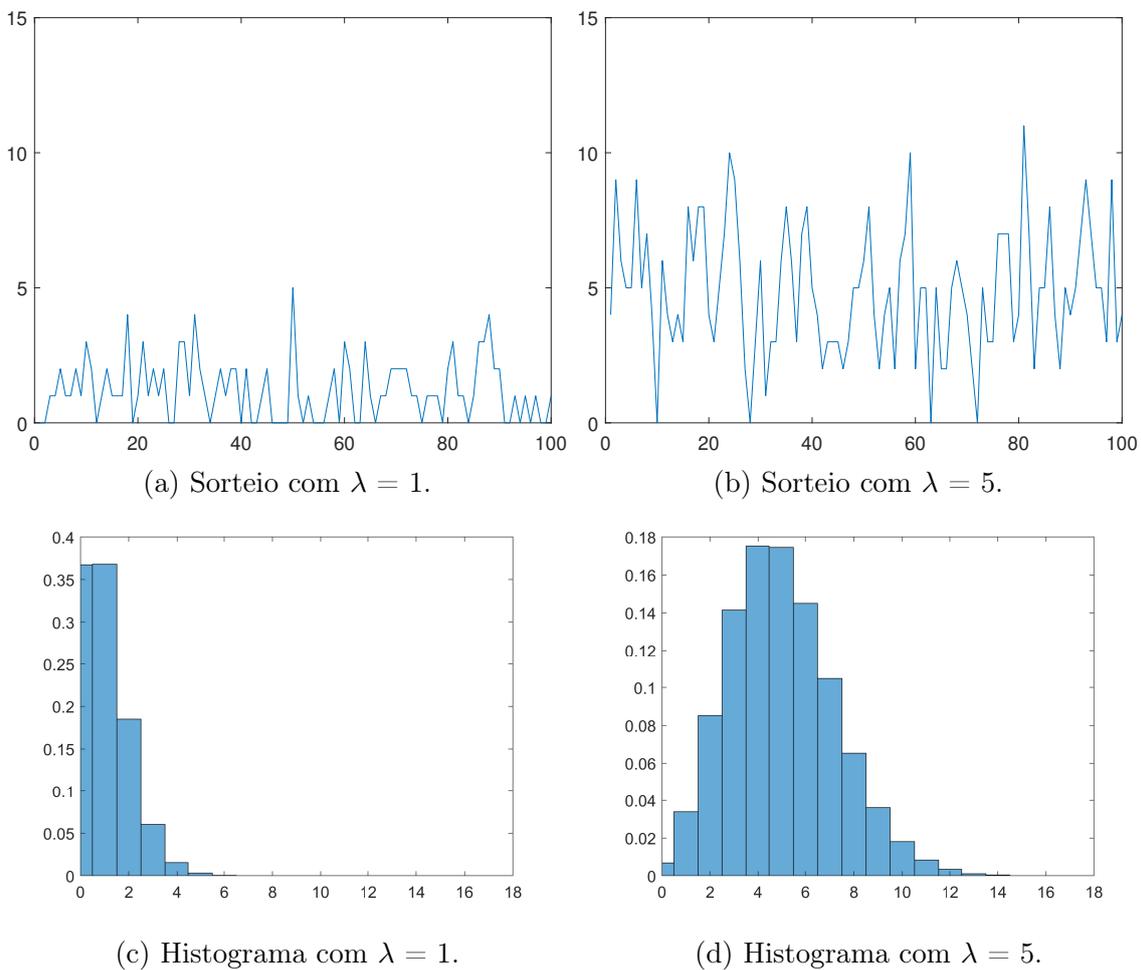


Figura 2.7: Sorteio de uma distribuição de Poisson com os respectivos histogramas para diferentes valores de λ .

2.6.4 Distribuição Uniforme

Uma variável aleatória X com distribuição Uniforme possui a seguinte pdf:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{(b-a)}, & \text{se } a < x \leq b \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (2.45)$$

Utilizando a Eq. (2.45) nas Eqs. (2.38) e (2.39), a média e a variância são dadas, em termos de a e b , por

$$\begin{aligned} E[X] &= \frac{a + b}{2}, \\ \sigma_X^2 &= \frac{1}{12}(b - a)^2 \end{aligned} \quad (2.46)$$

Na Fig. 2.8 estão ilustrados os efeitos dos valores de a e b na distribuição uniforme. Os gráficos seguem o mesmo padrão dos gráficos das distribuições anteriores.

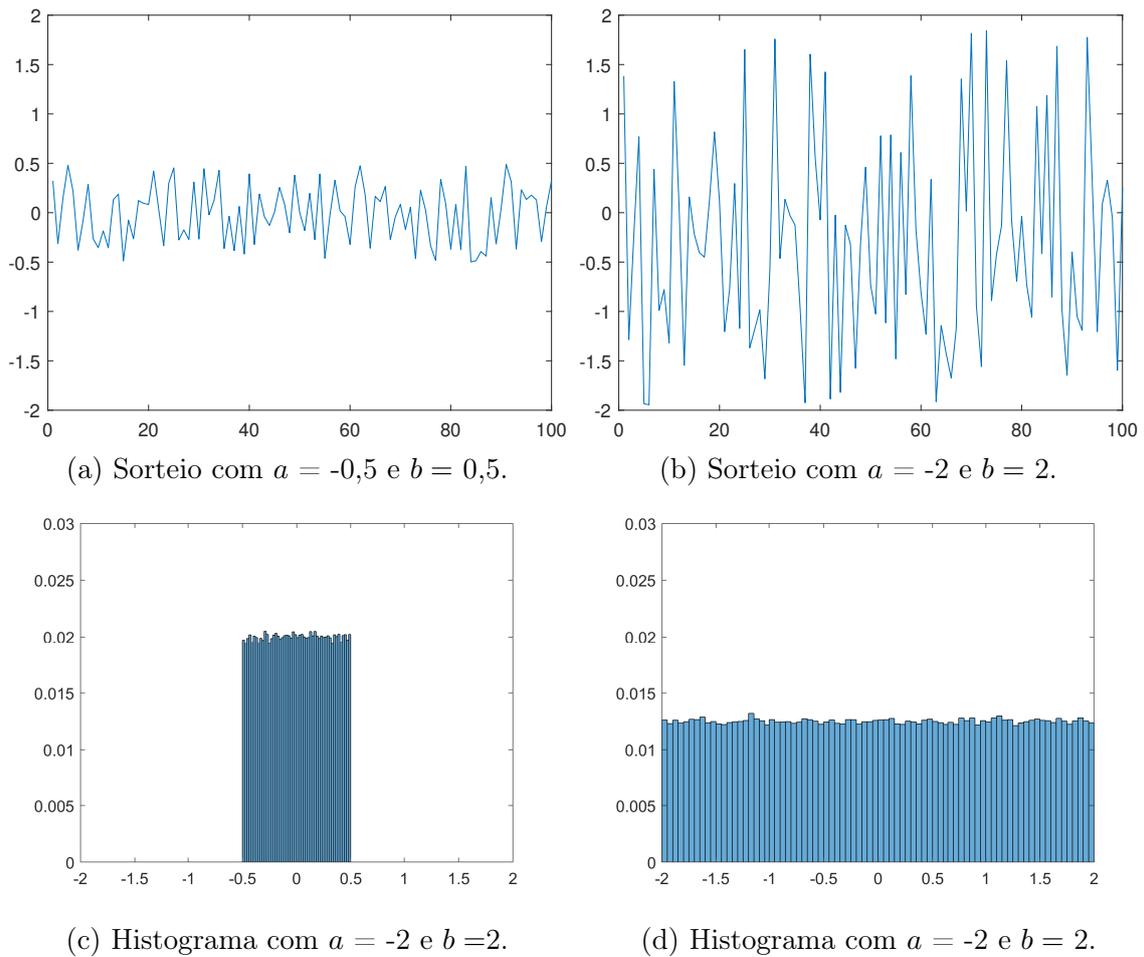


Figura 2.8: Sorteio de uma distribuição uniforme com os respectivos histogramas para diferentes valores de a e b .

2.6.5 Distribuição de Bernoulli

A variável aleatória X com distribuição de Bernoulli possui a seguinte pdf:

$$f_X(x) = \begin{cases} 1, & \text{com probabilidade } p \\ 0, & \text{com probabilidade } (1 - p) \end{cases} \quad (2.47)$$
$$0 \leq p \leq 1.$$

O parâmetro p pode ser entendido como a probabilidade de um determinado evento ocorrer. Os valores sorteados de uma distribuição de Bernoulli, dessa forma, indicam se um determinado evento, de probabilidade p ocorreu ou não.

Utilizando a Eq. (2.47) nas Eqs. (2.38) e (2.39), obtêm-se a média e o desvio padrão de X , dados por

$$E[X] = p$$
$$\sigma_X^2 = p(1 - p); \quad (2.48)$$

Para avaliar os efeitos de p na distribuição de Bernoulli, foram feitas as simulações indicadas na Fig. 2.9, onde são mostrados os sorteios de números oriundos desta distribuição e os histogramas associados para dois valores de p .

2.6.6 Processos Estocásticos

Um Processo Estocástico é definido como uma coleção de amostras de variáveis aleatórias indexadas no tempo [22].

Uma amostra de um processo estocástico pode ser gerada a partir da distribuição de uma variável aleatória, sorteando valores dessa distribuição para cada instante de tempo. Este procedimento é composto por variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas para quaisquer dois instantes de tempo. Dessa forma, valores passados de um determinado processo estocástico não possuem poder preditivo para valores futuros.

Processos estocásticos gerados sem alterar os parâmetros da distribuição ao longo do tempo são chamados de estacionários no sentido amplo [22]. Caso apenas a média e a variância da distribuição sejam mantidas constantes, independentemente do instante de tempo, o processo é chamado estacionário no sentido estrito.

Outra propriedade decorrente deste método de geração de amostras de processos estocásticos diz respeito à ergodicidade. As estatísticas calculadas ao longo do tempo de uma realização de um processo estocástico são idênticas às estatísticas da variável aleatória que o gerou.

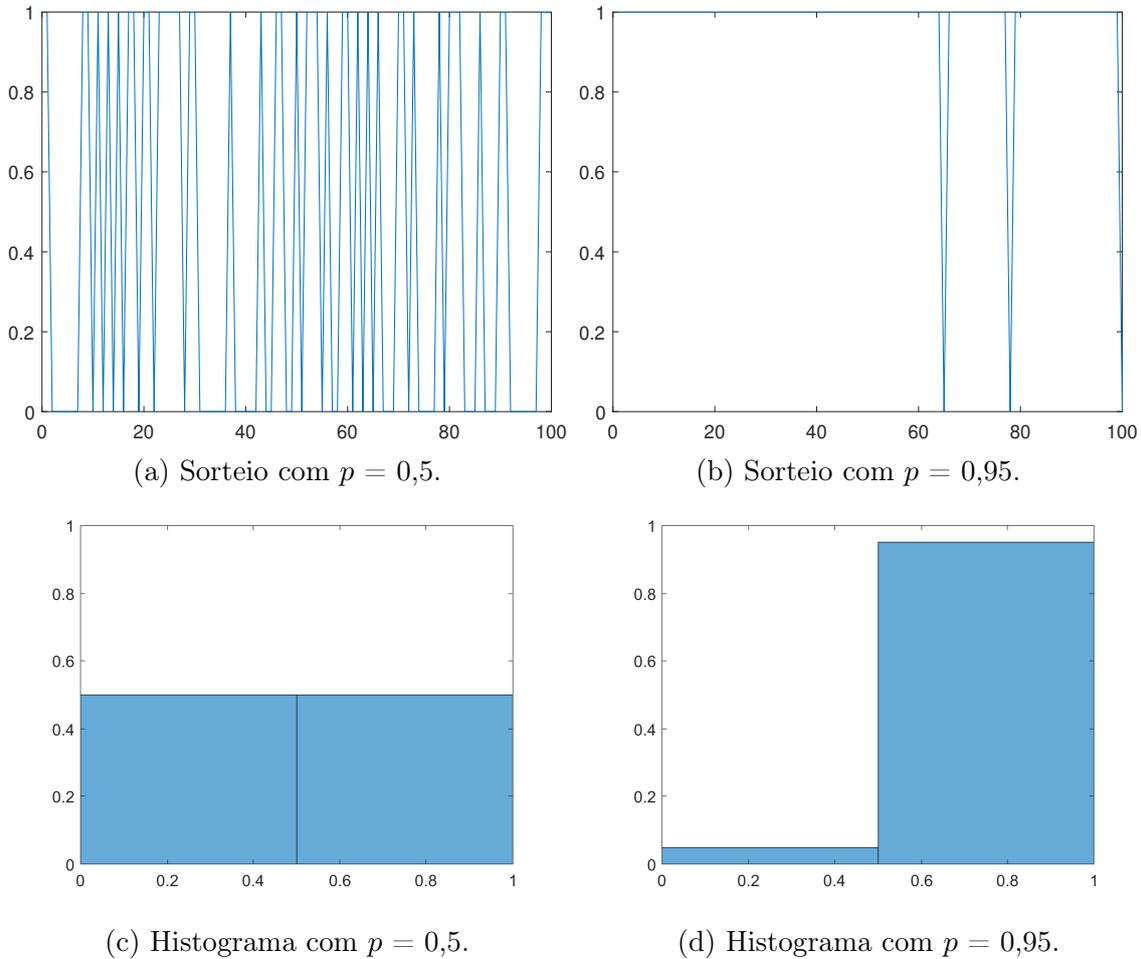


Figura 2.9: Sorteio de uma distribuição de Bernoulli com os respectivos histogramas para diferentes valores de p .

Neste trabalho, processos estocásticos são chamados de ruído por conveniência. O ruído branco gaussiano – processo estocástico utilizado em diversas aplicações [25, 26] – é gerado pelo método apresentado empregando uma variável aleatória de distribuição gaussiana com média nula. A variância é deixada como parâmetro a ser escolhido do ruído branco.

2.6.7 Ruído Rosa

O ruído rosa é um tipo especial de ruído que, como descrito em [27–29], surge em diversos fenômenos físicos. Em acústica, este tipo de ruído é utilizado na equalização de sistemas de áudio. Sua principal característica diz respeito ao seu espectro de potência, que deve obedecer à seguinte relação:

$$S(f) \propto \frac{1}{f}. \quad (2.49)$$

Diversos métodos para geração deste tipo de ruído, bem como suas variantes,

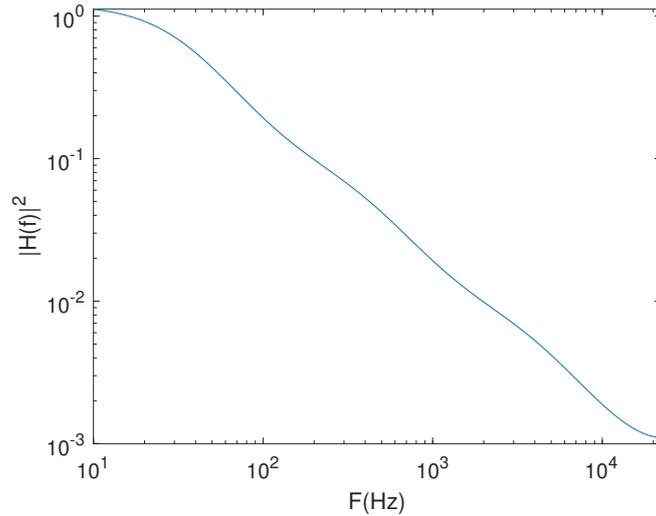


Figura 2.10: Magnitude quadrática da resposta em frequência referente ao filtro da Eq. (2.50).

são encontrados em [30] e nas suas referências. Tomando como referência o artigo [30], o ruído rosa pode ser gerado passando-se um ruído branco pelo filtro digital com função de transferência

$$H(z) = \frac{0.049922035 - 0.095993537z^{-1} + 0.050612699z^{-2} - 0.004408786z^{-3}}{1 - 2.494956002z^{-1} + 2.017265875z^{-2} - 0.522189400z^{-3}}. \quad (2.50)$$

A magnitude quadrática da resposta em frequência associada ao filtro da Eq. (2.50) (em frequência em Hz) está ilustrada na Fig. 2.10.

Na Fig. 2.11 estão representadas duas realizações de ruído rosa. Em uma delas, o ruído rosa foi sintetizado com ruído branco gaussiano com $\sigma^2 = 1$, enquanto que na outra foi empregado ruído branco gaussiano com $\sigma^2 = 4$. Na Fig. 2.11 também encontram-se os espectros de potência associados.

2.6.8 Ruído Velvet

O ruído Velvet foi projetado especificamente para servir de modelo para a cauda reverberante de uma IR. Os algoritmos propostos em [24, 31] utilizam o ruído Velvet para definir os coeficientes de um filtro que será usado para filtrar um ruído branco e, assim, gerar a cauda reverberante. A abordagem deste trabalho é diferente, uma vez que a parte inicial da IR é gerada pelo traçado de raios, e o ruído Velvet é utilizado apenas para definir os valores da cauda reverberante.

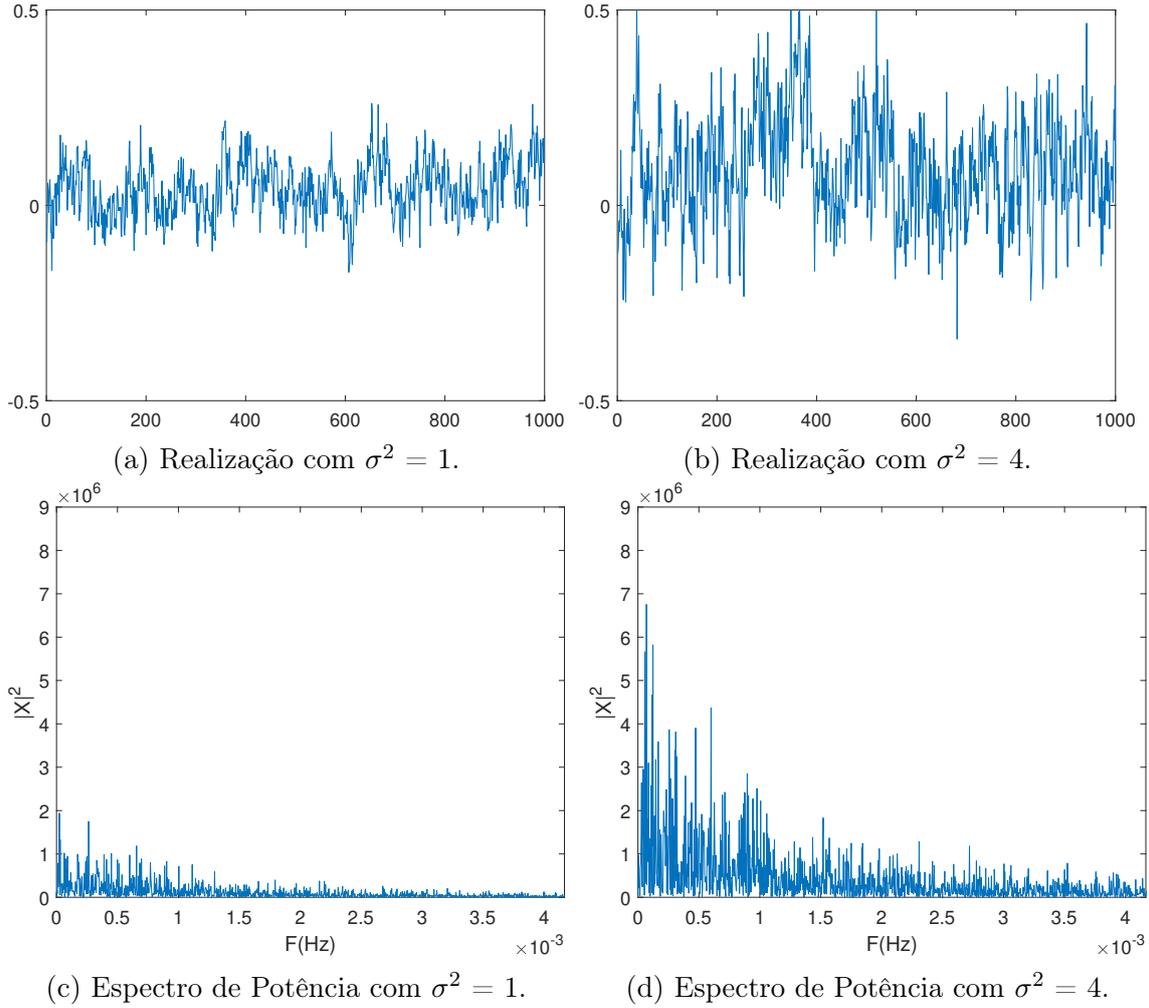


Figura 2.11: Ruído Rosa e espectro de potência associado para diferentes valores de σ^2 .

Por definição o ruído Velvet é gerado de acordo com a Equação 2.51:

$$\eta(k) = \sum_{m=0}^M \alpha(m) \delta(k - \lfloor F_s T_d(m + r(m)) \rfloor), \quad (2.51)$$

onde o símbolo $\lfloor \cdot \rfloor$ indica o arredondamento de um número real para o inteiro imediatamente inferior, $\delta(n)$ é o impulso unitário, $r(m)$ é um número sorteado de uma distribuição uniforme com $a = 0$ e $b = 1$, $\alpha(m)$ é a amplitude do ruído que pode ser -1 ou 1, T_d define o espaçamento médio entre as amostras, enquanto que F_s é a taxa de amostragem considerada.

Neste trabalho, o parâmetro mais importante para a geração do ruído é o T_d , pois define a distância média (em segundos) entre os picos do ruído Velvet. A partir dessa distância é possível definir a “concentração”, λ , do ruído em picos por segundo, onde $\lambda = 1/T_d$. Este fator é fundamental para controlar a energia da cauda reverberante quando comparada com a energia do início da IR.

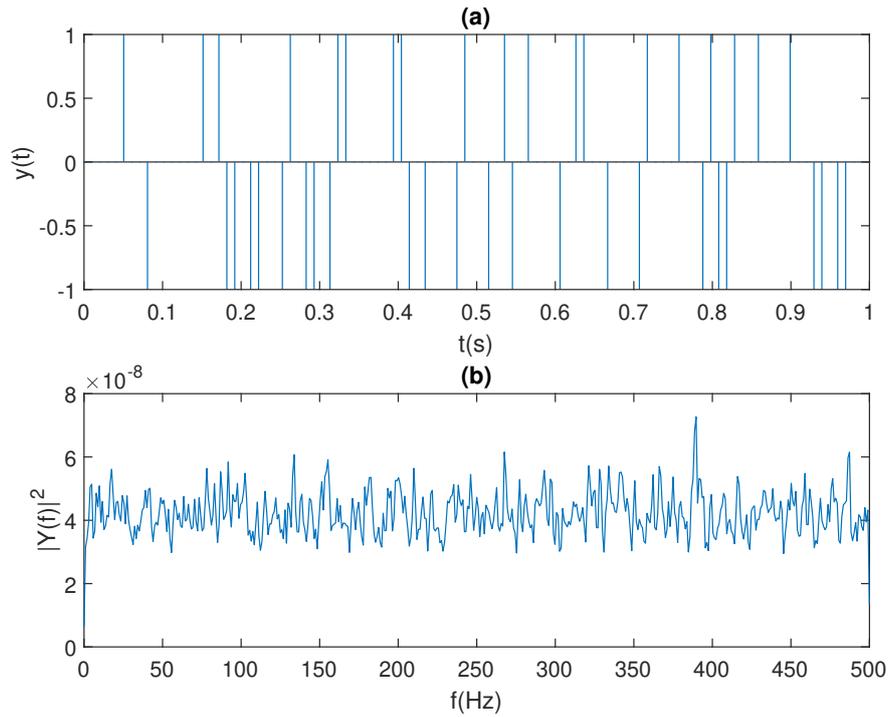


Figura 2.12: (a) Realização do ruído Velvet com $F_s = 100$ Hz e (b) espectro de potência associado.

O exemplo de uma realização do ruído Velvet, com $F_s = 100$ Hz, pode ser observada na Fig. 2.12. Na mesma figura, foi incluído o espectro de potência associado. Assim como o ruído branco, o ruído velvet possui a mesma energia em todas as frequências, com a vantagem de possuir a concentração parametrizável.

Capítulo 3

Análise dos Ruídos

Para modelar a cauda reverberante foram escolhidos modelos estatísticos devido ao comportamento do campo sonoro – altamente difuso [4–7] – presente nesta etapa. Assim, um dos objetivos desse trabalho é determinar quais os tipos de ruído (modelos estatísticos) são mais adequados para modelar a cauda reverberante de respostas ao impulso de salas. Na literatura, o termo “ruído”, na grande maioria dos casos, refere-se ao ruído de fundo de uma determinada medição. Neste trabalho, vale notar, o “ruído” representa uma série aleatória construída como indicado na Seção 2.6. Neste capítulo, é apresentada uma análise dos diferentes tipos de ruídos (processos estocásticos), considerando características temporais, espectrais, estatísticas e de energia.

Para essa análise, diversas IRs de uma sala, com duas configurações de reverberação, foram comparadas com IRs sintetizadas usando diferentes ruídos. As IRs de cada caso e os coeficientes de absorção dos materiais foram medidos de acordo com normas internacionais, definidas pelo Instituto de Acústica Técnica (ITA - *Institute of Technical Acoustics* da Universidade RWTH (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule), em Aachen, Alemanha [32].

As IRs de “referência” foram medidas em uma câmara reverberante [32], onde foram alterados os materiais de absorção, sem alterar a geometria da sala. A primeira configuração consiste na sala com as paredes originais, sem nenhum tipo de revestimento, o que confere à sala um tempo de reverberação extremamente alto, acima de 4 segundos em todas as bandas de frequência. Na segunda configuração, apenas uma das paredes foi revestida com material fono-absorvente (lã de rocha), conforme indicado na Fig. 3.1, diminuindo o tempo de reverberação e criando uma sala com características de absorção muito heterogêneas. Em ambos os casos, utilizou-se a mesma configuração para a fonte e os receptores. A partir da IR medida em cada configuração, calculou-se o tempo de reverberação das 9 bandas de oitava (divididas conforme [33]). Os tempos de reverberação obtidos para cada configuração são apresentados na Fig. 3.2. Todos os parâmetros nesse trabalho foram calculados

através da biblioteca de funções disponibilizada pelo ITA-Aachen ITA *ToolBox* [34], utilizando sempre como parâmetro de entrada uma resposta ao impulso, seja medida ou simulada.

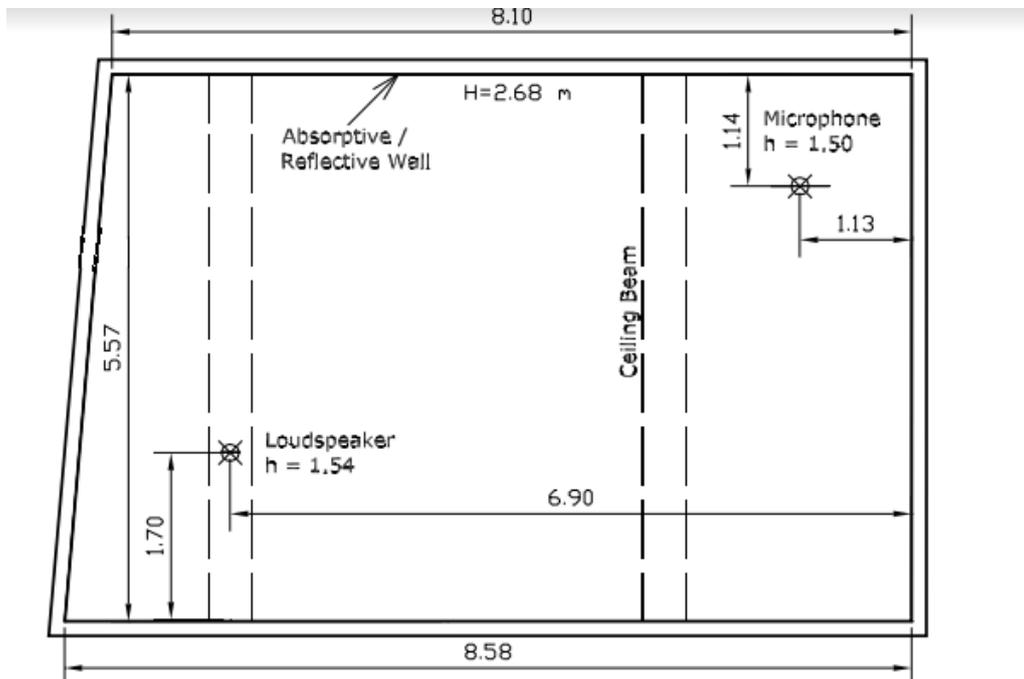


Figura 3.1: Vista superior da sala de medições.

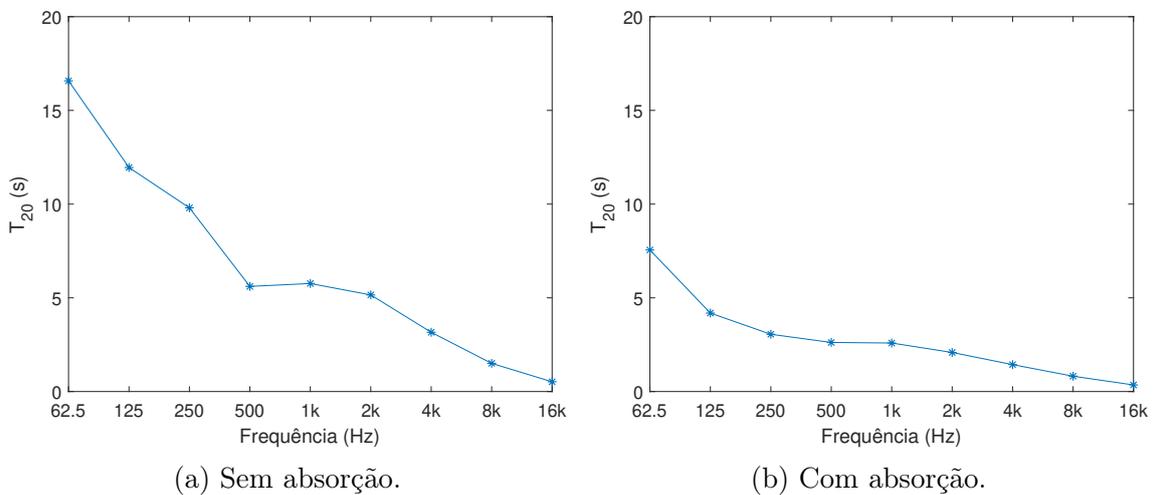


Figura 3.2: Tempo de reverberação em função da frequência para os dois cenários estudados.

Neste trabalho, deseja-se encontrar um modelo adequado para a cauda reverberante que, devido à natureza da propagação sonora, representa apenas uma parcela da IR. A cauda reverberante é a parte principal da IR responsável pelo T_{60} , uma vez que o tempo relativo às primeiras reflexões é desconsiderado ao se iniciar a medição do T_{60} após 5 dB de decaimento da energia da IR [19]. Por esse motivo, não

foram avaliados neste trabalho parâmetros de qualidade acústica que consideram as primeiras reflexões, tais como Fator de Clareza ou Definição.

3.1 Síntese das Caudas Reverberantes

O processo de síntese da cauda reverberante a partir de um ruído consiste de quatro etapas: gerar o ruído com características apropriadas, decompor o ruído gerado em sub-bandas de frequência, aplicar o decaimento energético correspondente ao sinal de cada sub-banda e, finalmente, somar todas as séries resultantes.

Estas etapas estão representadas por um diagrama de blocos na Fig. 3.3. Nesta Figura, Os blocos identificados como $H_i(z)$ indicam a operação de filtragem linear enquanto que os blocos identificados com EDC_i aplicam o decaimento energético ao sinal de entrada. Finalmente, a saída do bloco $\text{sum}()$ é definida como a soma de todos os sinais de entrada.

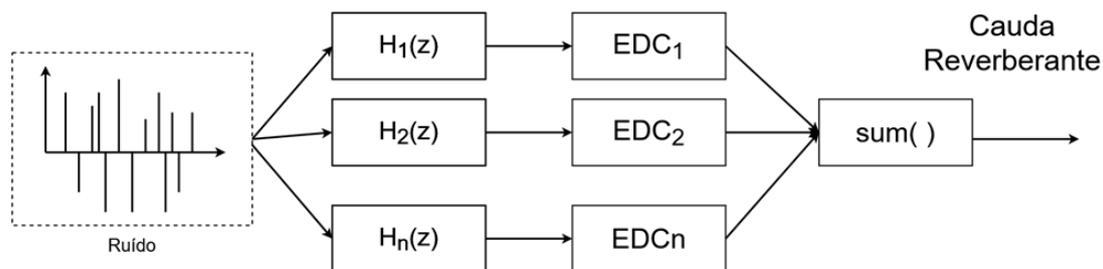


Figura 3.3: Síntese da cauda reverberante.

3.1.1 Síntese do Ruído

Devido à natureza da cauda reverberante [5], os ruídos foram gerados sorteando amostras das distribuições apresentadas na Seção 2.6. Como o valor de uma determinada amostra é independente das amostras passadas, temos que o ruído resultante é i.i.d.. Ou seja, no processo de síntese, são sorteados valores independentes entre si e de uma mesma distribuição.

3.1.2 Filtros Utilizados

Na segunda etapa foram empregados filtros de oitava, como especificados na norma [33]. Os filtros foram implementados usando a biblioteca *Audio Toolbox* do MatLab. As magnitudes das respostas em frequência dos filtros estão ilustradas na Fig. 3.4.

A ordem de um filtro determina a sua seletividade, ou seja, o quão bem a informação presente nas frequências de interesse é preservada e, nas outras faixas, rejeitada. Quanto maior a ordem do filtro, mais longa é a sua resposta ao impulso,

o que demanda um tempo maior de processamento do ruído. A escolha da ordem dos filtros levou em consideração a filtragem realizada pela toolbox do ITA que, por padrão, utiliza filtros IIR (do inglês, *Infinite Impulse Response*) de ordem 10. A seletividade destes filtros está indicada na Fig. 3.4. A ordem dos filtros empregados não foi alterada, uma vez que o objetivo principal desta etapa é aproximar os parâmetros acústicos da RIR sintetizada aos da RIR medida. Para fins de comparação, empregar os mesmos filtros é suficiente, não sendo importante empregar filtros altamente seletivos.

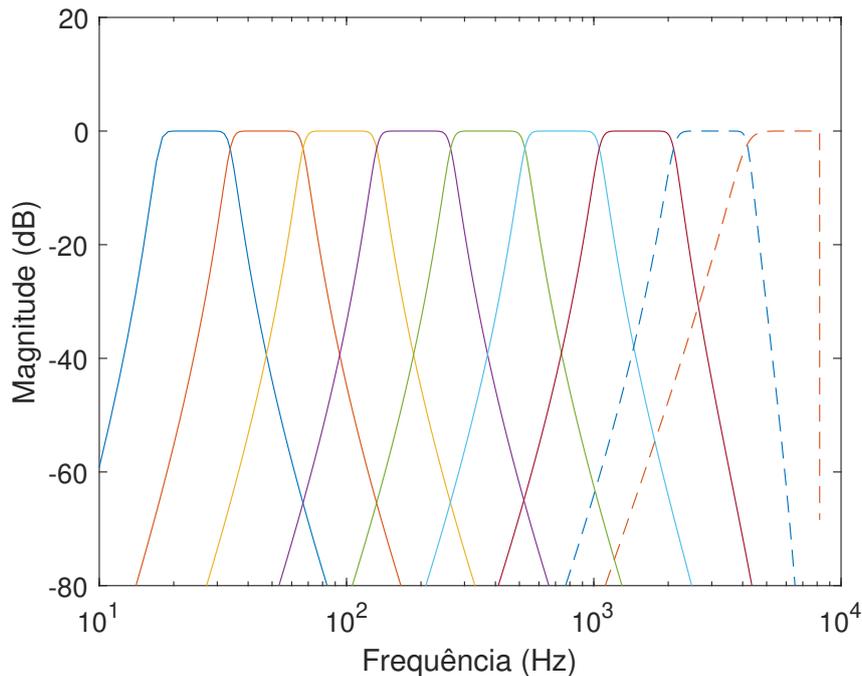


Figura 3.4: Resposta em frequência dos filtros passa-faixa.

3.1.3 Decaimento Energético

O som, ao se propagar, perde energia, seja pelas reflexões em objetos ou pela absorção do ar. Assim, uma vez definido o ruído associado a cada sub-banda, deve-se incluir o decaimento energético característico da sala. Este decaimento pode ser calculado a partir de diferentes métodos, como indicado em [13, 17]. De uma maneira geral, estes métodos fornecem um coeficiente de absorção médio para cada sub-banda. Neste cálculo, a absorção sonora de cada superfície reflexiva é considerada. Além desse valor, deve-se incluir a absorção do ar para uma representação apropriada do decaimento energético.

A determinação desses coeficientes de absorção em função da geometria da sala e das características de seus materiais é uma tarefa complexa, que não está no escopo desta pesquisa. Diversos trabalhos foram publicados sobre o assunto, mas não há ainda um consenso sobre a melhor metodologia a ser adotada, uma vez

que o decaimento em cada local da sala pode ser diferente e altamente influenciado pelas características geométricas da sala, tais como sua composição por múltiplos volumes conectados ou por formas geométricas variadas com mesmos volumes e área de absorção.

Por esse motivo, optou-se nesse trabalho por extrair os coeficientes de decaimento diretamente das respostas de referência, garantindo que a taxa de decaimento está correta, ou muito próxima da real. Dessa forma, a análise fica restrita apenas ao desempenho de simulação para cada tipo de ruído utilizado na síntese da cauda reverberante.

O método de integração reversa de Schroeder – descrito detalhadamente em [17] – é utilizado para calcular a curva de decaimento energético (EDC, do inglês *Energy Decaying Curve*). O coeficiente de uma determinada sub-banda de oitava é obtido aproximando a EDC correspondente pela soma de duas exponenciais, ou seja

$$\widehat{\text{EDC}}_i(t) \approx Ae^{-\beta_1(i)t} + Be^{-\beta_2(i)t}, \quad (3.1)$$

onde $\beta_1(i)$ e $\beta_2(i)$ são os coeficientes de absorção sonora correspondentes à sub-banda de oitava i , $\widehat{\text{EDC}}$ é a EDC estimada para a RIR medida e, finalmente, A e B são fatores de escala. A aproximação indicada na Eq. (3.1) é obtida pelo método dos Mínimos Quadrados Não Lineares [35]. No caso, as variáveis A , B , β_1 e β_2 são calculadas de maneira a minimizar o erro quadrático médio entre a EDC medida e a soma das funções exponenciais. Este conjunto de variáveis é calculado para cada faixa de frequência e para cada realização da IR.

O modelo da Eq. 3.1 foi escolhido por apresentar um bom ajuste às EDCs medidas e por ser relativamente simples – composto por apenas 2 exponenciais. Outros modelos foram considerados no ajuste da EDC mas, de uma maneira geral, o ajuste da Eq. 3.1 foi satisfatório considerando os objetivos deste trabalho.

O modelo da Eq. (3.2), embora mais simples que o da Eq. (3.1), fornece uma boa aproximação em casos onde a propagação sonora é próxima da propagação em campo livre [5], sendo um bom candidato para modelar a EDC em ambientes com revestimento acústico e poucos objetos. Na Fig. 3.5 são plotados as curvas de ambos os modelos, sendo seus coeficientes calculados a partir da EDC medida. Após o ajuste, a diferença entre a curva da Eq. (3.2) e a curva medida aumenta consideravelmente a partir de 0,5 s. Esta diferença, observada logo no início da curva, influencia diretamente o cálculo do tempo de reverberação da IR, o que pode resultar em valores simulados consideravelmente diferentes dos valores medidos. O modelo da Eq. (3.1), por outro lado, apresenta um ajuste muito mais aderente à curva medida, resultando em parâmetros acústicos da IR simulada mais consistentes

com os valores da IR medida.

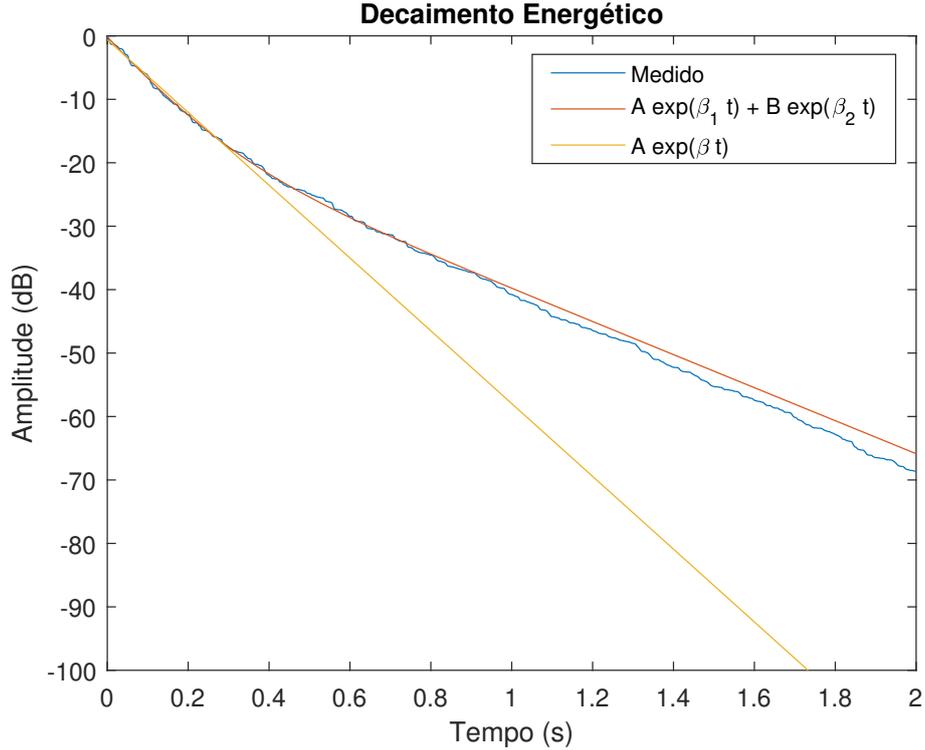


Figura 3.5: Ajuste da EDC pelas Eqs. (3.1) e (3.2) para a frequência de 250 Hz no caso com absorção.

A Eq. (3.1) é suficiente para encontrar o decaimento energético da sub-banda de interesse. Ao lidar com dados medidos, todavia, o cálculo direto de β_1 e β_2 pode ser afetado pelo ruído de medição [36]. Assim, para contornar esse problema e obter uma medição mais confiável, técnicas de estimação e compensação do ruído são empregadas para cada IR. Estas técnicas, e os seus efeitos na estimativa da EDC, são descritas em maiores detalhes no artigo [36]. Neste trabalho, o algoritmo de Ludenby é empregado na detecção do ruído de fundo da IR medida [37], enquanto que a compensação é feita pelo método descrito em [38]. A sua implementação está disponível na Toolbox do ITA.

O processo de ajuste da EDC é ilustrado na Fig. 3.5. O ajuste, a título de comparação, foi feito para dois modelos distintos: empregando a Eq. (3.1), e empregando uma única exponencial, ou seja,

$$\widehat{\text{EDC}}_i(t) \approx A e^{-\beta_i t}. \quad (3.2)$$

3.2 Avaliação das RIRs Sintetizadas

A síntese da RIR é um processo inerentemente estatístico, uma vez que se baseia no sorteio de séries aleatórias. Logo, para avaliar o efeito de uma determinada

distribuição na síntese da cauda reverberante, foram utilizadas diferentes realizações para cada tipo de ruído. Também foram observados os efeitos dos parâmetros de cada distribuição no T_{20} . O T_{20} [19] é uma estimativa do T_{60} , obtida calculando-se o tempo que a energia do sinal decai em 20 dB em relação a energia inicial, desconsiderando-se o decaimento inicial de 5 dB [19]. O tempo de reverberação T_{20} foi escolhido, ao invés do T_{60} , devido ao nível do ruído observado nas medições, uma vez que o método implementado pelo ITA Toolbox não foi capaz de calcular o T_{60} diretamente. O T_{20}

Ao todo, foram avaliadas 30 realizações para cada configuração “distribuição-parâmetro”.

Para avaliar a qualidade das RIRs sintetizadas foi escolhido o Erro Relativo (E_r) entre os valores de T_{20} das RIRs medida e sintetizada em cada caso – com e sem absorção – para cada sub-banda, ou seja,

$$E_r = \frac{T_{20} - \hat{T}_{20}}{T_{20}}, \quad (3.3)$$

onde T_{20} é o parâmetro de referência e \hat{T}_{20} é obtido da resposta sintetizada.

O T_{20} de referência, por ser um parâmetro da sala, deve ser independente do arranjo fonte-receptor. Logo, para alcançar uma estimativa mais próxima do valor real, o T_{20} de referência foi calculado fazendo-se uma média especial do T_{20} obtido para cada uma das seis medições disponíveis.

As distribuições empregadas possuem parâmetros que alteram as propriedades energéticas do ruído gerado. Apenas a faixa dinâmica pode ser modificada nas distribuições Gaussiana, Uniforme e no ruído Rosa. Ou seja, a simetria do ruído não é parametrizável tal qual essas distribuições foram definidas. Já as distribuições de Poisson, Bernoulli e Velvet possuem como parâmetro a Concentração, definida como o número de ocorrências por segundo.

A Concentração não deixa de estar vinculada à energia do ruído, mas, adicionalmente, é capaz de controlar – até certo ponto – a simetria da distribuição em torno de seu valor médio. Este parâmetro é particularmente útil quando se deseja simular a quantidade de reflexões que uma frente de onda sofre no percurso até o receptor. A densidade de reflexões aumenta quadraticamente com o tempo [5, 39]. Logo, em teoria, este efeito poderia ser simulado aumentando-se a concentração do ruído com o tempo. Por simplicidade, e por não conhecer o mapeamento exato entre a densidade de reflexões e a concentração do ruído, foram considerados apenas ruídos de concentração constante.

Visando uma comparação mais abrangente, o desempenho dos vários ruídos foi avaliado para quatro valores diferentes de concentração: 100, 1.000, 4.000 e 10.000 ocorrências por segundo.

3.2.1 Ruído Gaussiano

Ruído branco Gaussiano foi utilizado para sintetizar a RIR nessas simulações. O T_{20} foi avaliado para duas configurações de sala (com e sem absorção) e, em cada caso, o efeito da escolha de σ_X^2 foi verificado. As simulações foram feitas com $\sigma_X^2 = 1$ e $\sigma_X^2 = 100$, sendo os resultados mostrados nas Figs. 3.6 e 3.7.

Para o caso sem absorção, mostrado na Fig. 3.6, o erro médio absoluto é inferior a 7% até a faixa de 8 kHz. Para a faixa de 8 kHz a 16 kHz, o erro médio absoluto é de aproximadamente 20%. Esta grandeza não foi significativamente influenciada pelo parâmetro σ_X^2 . A diferença observada para os dois valores de σ_X^2 é relativamente pequena, em torno de 1,5%. Os erros máximos e mínimos, por outro lado, apresentaram uma variação maior. A maior diferença observada no erro máximo aconteceu na faixa de 125 Hz caindo de 8,5% com $\sigma_X^2 = 1$ para 3,1% com $\sigma_X^2 = 100$. A maior diferença observada no erro mínimo também aconteceu na faixa de 125 Hz. Nesta faixa, o erro mínimo – em valor absoluto – aumentou de 7,5% com $\sigma_X^2 = 1$ para 12,6% com $\sigma_X^2 = 100$.

Os resultados das simulações para o caso com absorção estão mostrados na Fig. 3.7. O maior erro médio foi observado na frequência de 250 Hz e as maiores variações do erro foram observadas na faixa de 62,5 Hz a 1 kHz. O valor de σ_X^2 , nesse caso, não alterou significativamente os resultados das simulações.

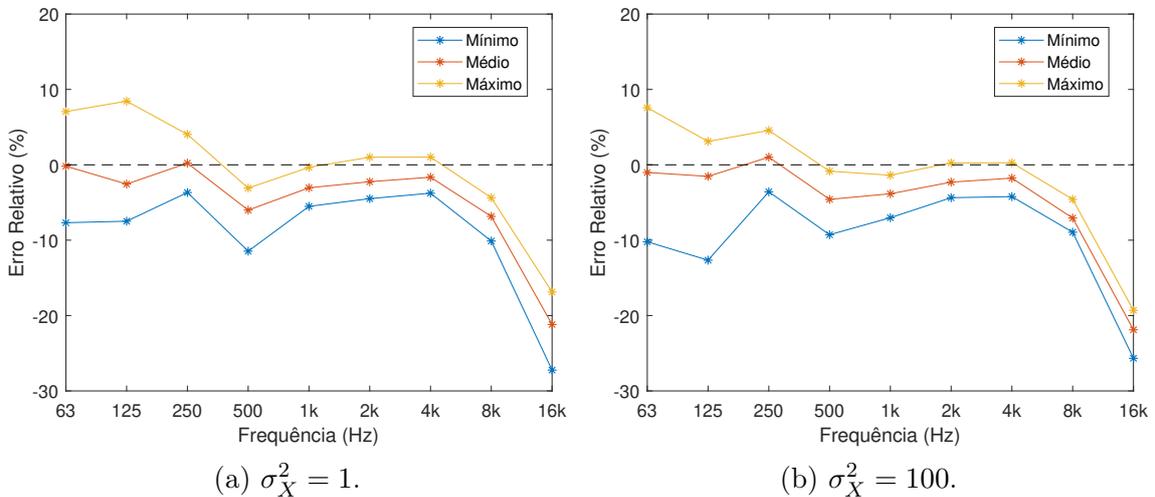


Figura 3.6: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído branco Gaussiano para o caso sem absorção.

3.2.2 Ruído Rosa

Como indicado na Seção 2.6.7, o ruído rosa é gerado a partir da filtragem de um ruído branco Gaussiano. Nestas simulações, os parâmetros de referência são os do ruído branco Gaussiano, ou seja, a simulação indicada por $\sigma_X^2 = 1$ significa que o

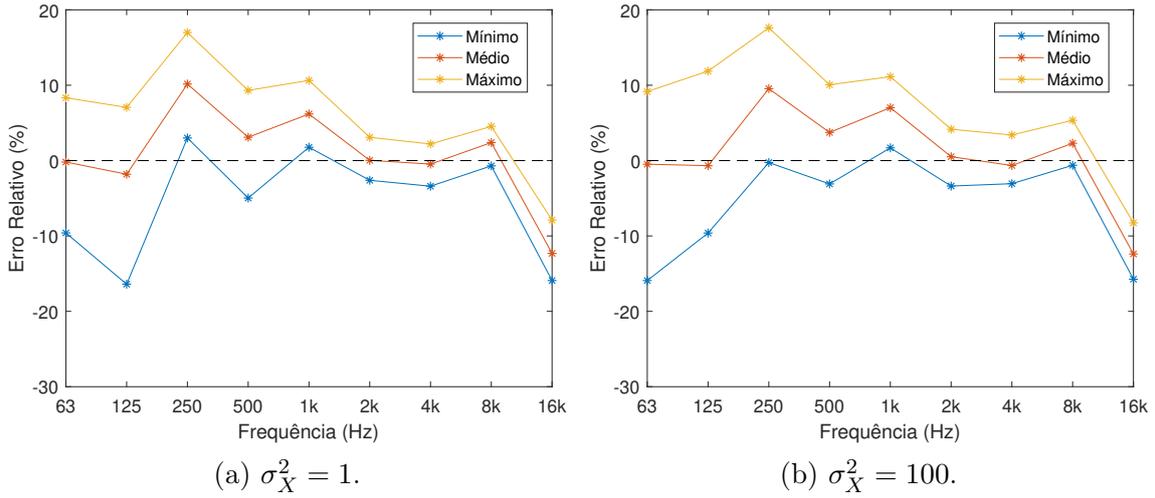


Figura 3.7: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído branco Gaussiano para o caso com absorção.

ruído rosa foi gerado utilizando ruído branco de variância unitária.

No caso sem absorção, indicado na Fig. 3.8, os maiores erros são observados na faixa de 8 kHz à 16 kHz. Em 16 KHz o erro médio e mínimo, em valores absolutos, são superiores a 30 %. O comportamento do erro para o ruído rosa foi similar ao observado com ruído branco Gaussiano na Seção 3.2.1. A maior diferença, observada na frequência de 16 kHz, pode ser explicada devido às componentes espectrais do ruído rosa possuírem características distintas das do ruído branco Gaussiano.

Para o caso com absorção, indicado na Fig. 3.9, as melhores estimativas se concentraram na faixa de 2 kHz a 8 kHz, apresentando sempre erros inferiores a 5 %. A maior diferença observada nas simulações, com relação à σ_X^2 , foram nos erros máximo e mínimo das frequências inferiores a 1 kHz. A faixa de variação aumentou ligeiramente com σ_X^2 . Para as outras faixas, entretanto, a variação praticamente não se alterou. O erro médio observado foi praticamente independente do valor de σ_X^2 .

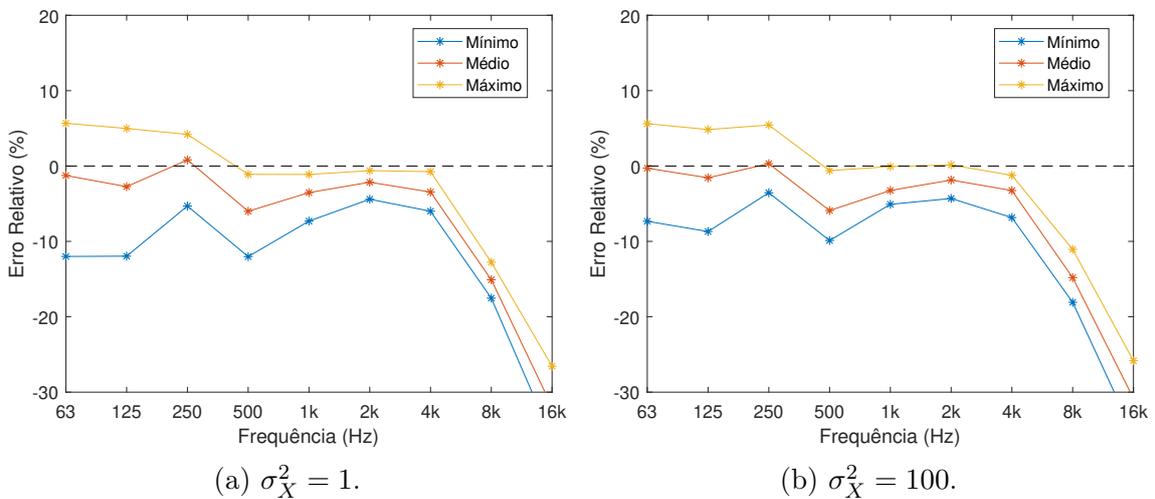


Figura 3.8: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído rosa para o caso sem absorção.

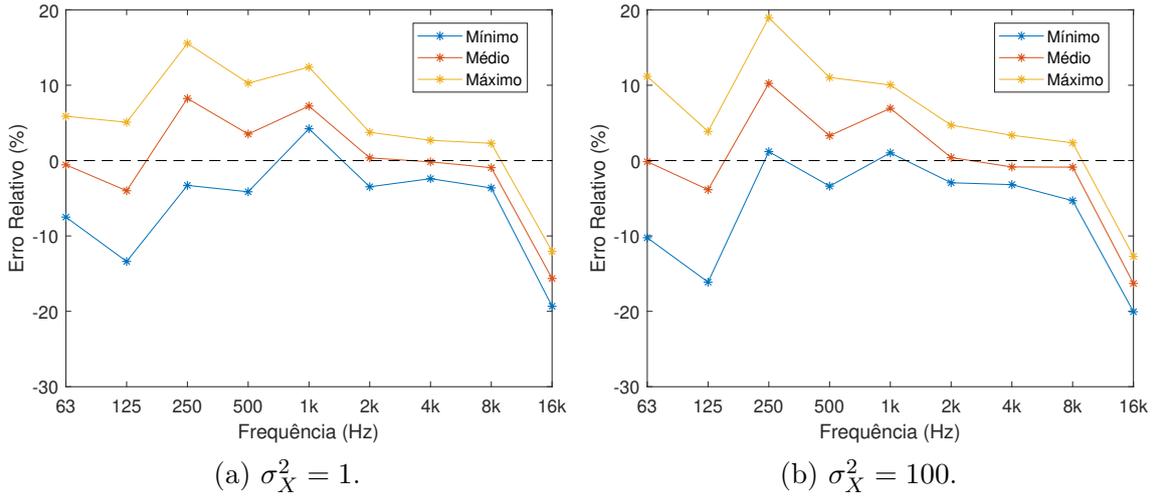


Figura 3.9: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído rosa para o caso com absorção.

3.2.3 Ruído com Distribuição Uniforme

Nestas simulações, o ruído branco foi gerado empregando uma distribuição uniforme. Para avaliar o efeito da energia do ruído nos parâmetros acústicos, dois casos foram simulados, ambos com $\bar{X} = 0$. No primeiro caso, os parâmetros utilizados foram $a = -0,5$ e $b = 0,5$, o que resulta em $\sigma_X^2 = 0,0833$. No segundo, foram usados $a = -50$ e $b = 50$, o que resulta em $\sigma_X^2 = 833$.

Para o caso com absorção, com resultados mostrados na Fig. 3.10, os menores erros foram observados para a faixa de frequência entre 62,5 Hz e 8 kHz. O erro médio máximo foi de, aproximadamente, 7 %. O valor σ_X^2 praticamente não modificou os resultados das simulações.

No caso sem absorção, com resultados mostrados na Fig. 3.11, o erro médio chegou a 10% para 250 Hz e o erro máximo foi superior a 20%, nessa mesma frequência. O valor de σ_X^2 pouco influenciou nos resultados finais.

3.2.4 Ruído com Distribuição de Poisson

Nessas simulações, geramos o ruído sorteando de maneira independente os valores de uma distribuição de Poisson, definida na Eq. (2.43). Os valores da concentração λ utilizados foram 100, 1.000, 4.000 e 10.000 ocorrências por segundo.

Os resultados do caso sem absorção estão mostrados na Fig. 3.12. Como esperado, as variações do erro em torno do seu valor médio diminuem conforme a concentração aumenta. O valor de λ modifica consideravelmente os resultados das simulações, mais especificamente as variações observadas de uma realização para outra. Quando a concentração é suficientemente alta, $\lambda = 10.000$, o comportamento do erro se aproxima do comportamento observado nas Seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3.

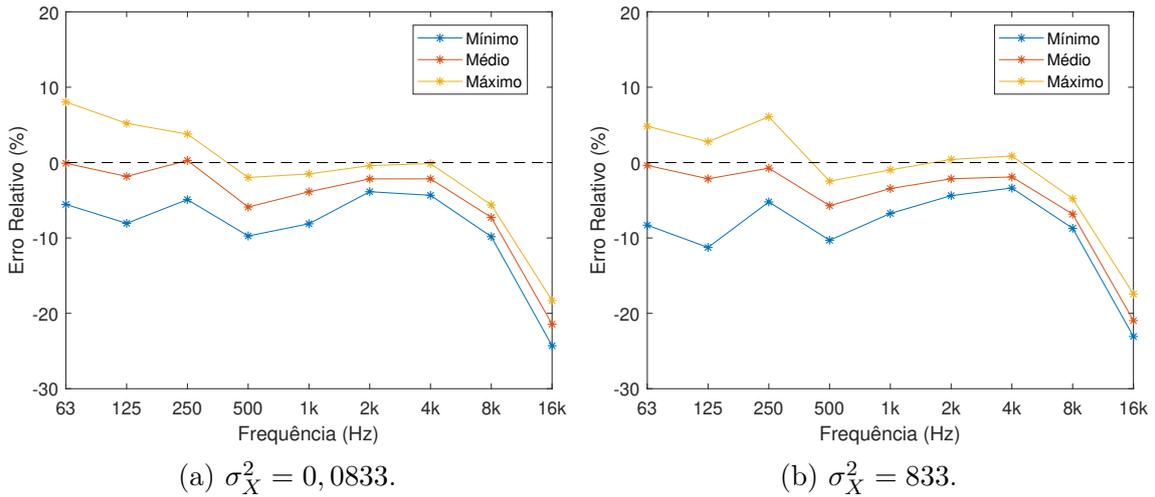


Figura 3.10: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído uniforme para o caso sem absorção.

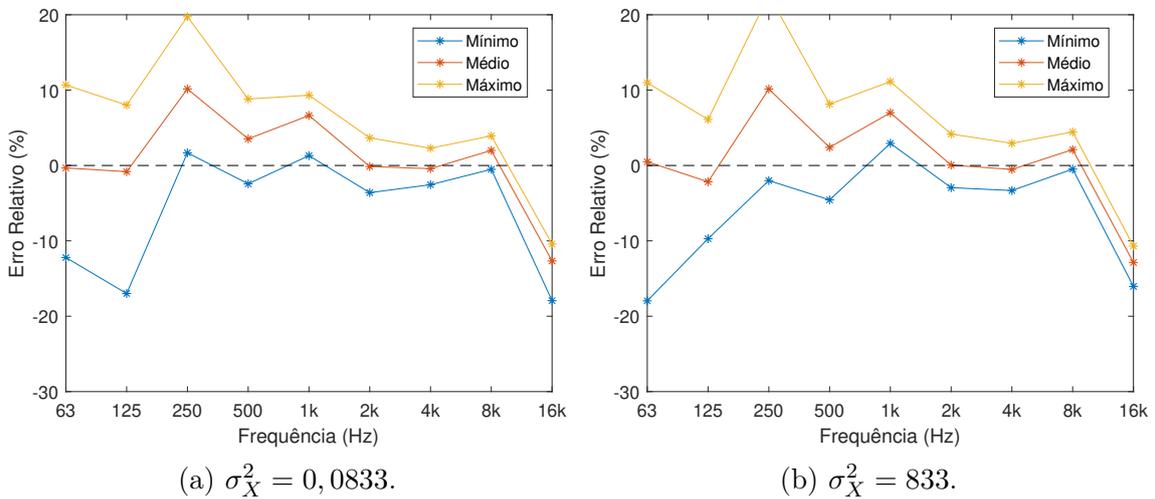


Figura 3.11: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído uniforme para o caso com absorção.

Os resultados do caso com absorção estão mostrados na Fig. 3.13. Com relação à concentração, os resultados foram semelhantes ao caso com absorção, ou seja, o valor de λ pouco alterou o comportamento do erro médio, enquanto que as variações do erro diminuíram conforme a concentração aumentou.

3.2.5 Ruído com Distribuição de Bernoulli

Nessa simulação, o ruído foi gerado a partir de uma sequência de valores sorteados de uma distribuição de Bernoulli. O resultado de cada sorteio pode ser 0 ou 1 de acordo com a Eq. (2.47). A distribuição de Bernoulli é parametrizada em função da probabilidade p de se sortear o número 1. No entanto, o ruído é gerado em termos de sua concentração – ocorrências por segundo. O mapeamento entre essas duas

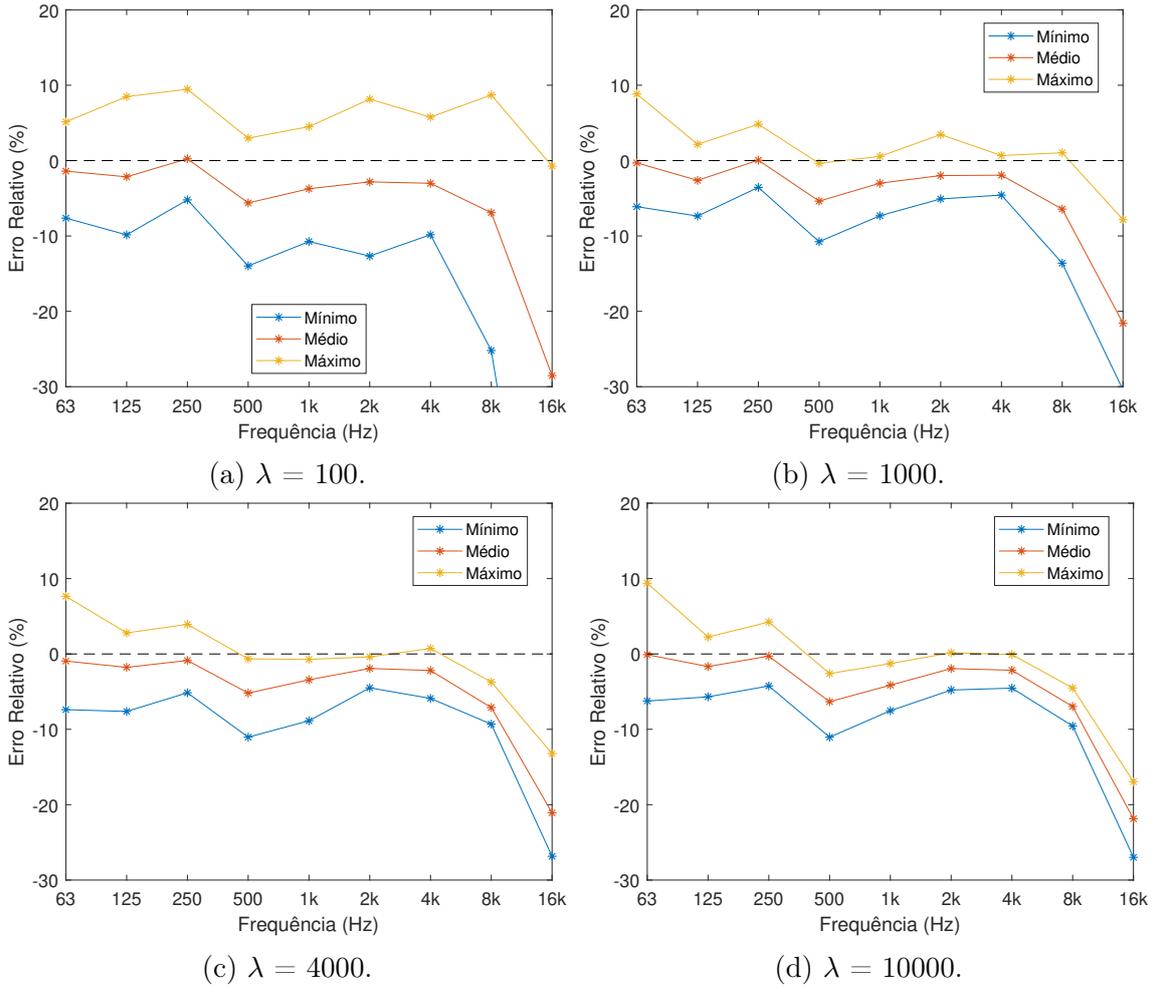


Figura 3.12: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Poisson para o caso sem absorção.

grandezas se dá pela taxa de amostragem F_s e pode ser calculado pela Eq. (3.4):

$$p = \frac{\lambda}{F_s}, \quad (3.4)$$

onde $F_s = 44100$ Hz.

Os valores associados de p para λ valendo 100, 1.000, 4.000 e 10.000 valem, respectivamente, 0,0023, 0,0227, 0,0907 e 0,2268. Consequentemente os valores de σ_X^2 são aproximadamente 0,0023, 0,0222, 0,0825 e 0,1753.

Os resultados das simulações para o caso sem absorção estão mostrados na Fig. 3.14, enquanto que os resultados das simulações para o caso com absorção estão mostrados na Fig. 3.15. Os diferentes valores de λ pouco impactam o erro médio das estimativas, com exceção da faixa de 16 kHz. Por outro lado, as variações do erro são bastante sensíveis à concentração.

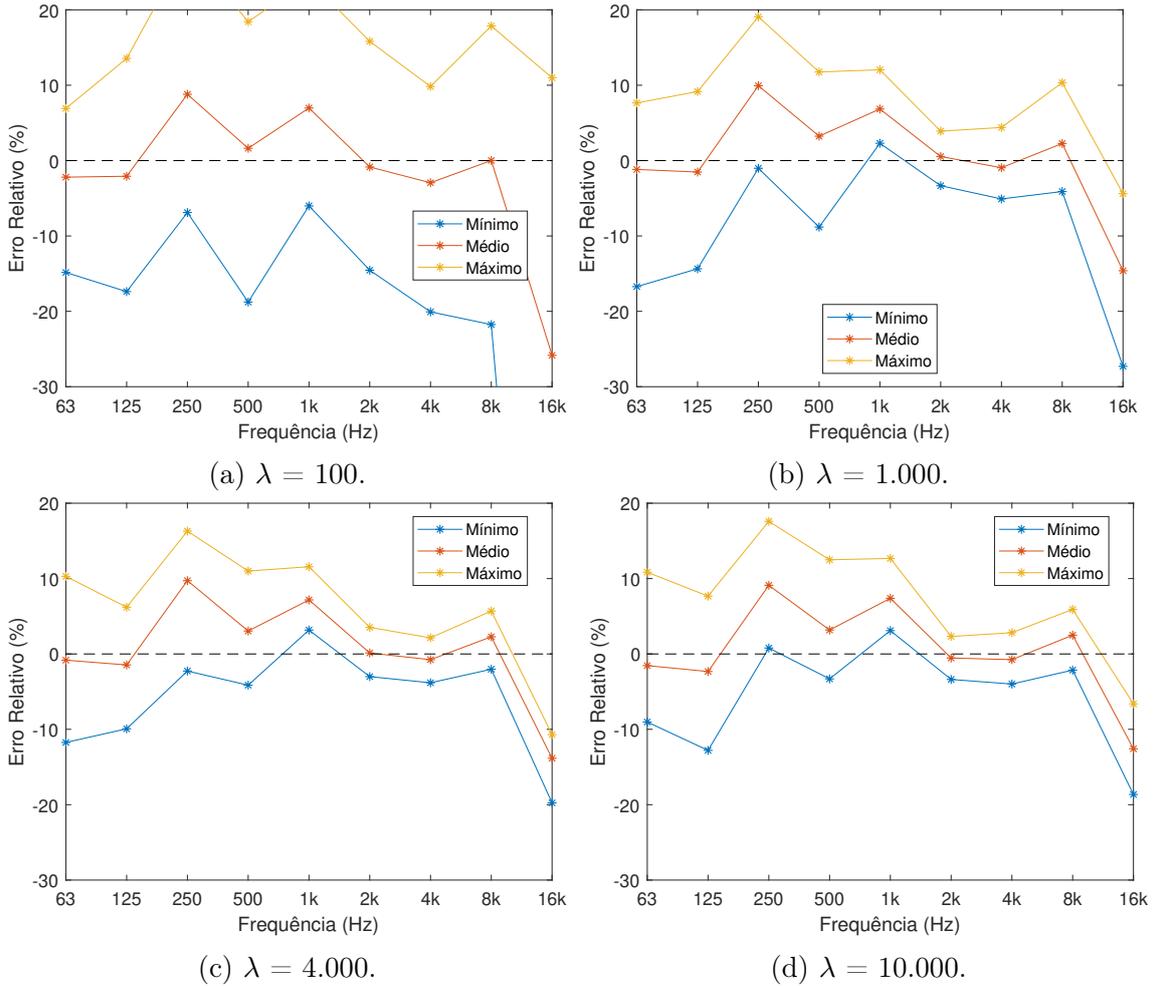


Figura 3.13: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Poisson para o caso com absorção.

3.2.6 Ruído Velvet

O ruído Velvet, de acordo com a descrição apresentada na Seção 2.51, permite controlar o espaçamento médio entre os picos da série. Nos ruídos Bernoulli e Poisson, a concentração foi utilizada para parametrizar os ruídos gerados. A correspondência dessas duas grandezas – concentração e espaçamento – é feita pelo valor inverso, ou seja,

$$\lambda = \frac{1}{T_d}, \quad (3.5)$$

onde T_d é o espaçamento médio entre as amostras, medido em segundos. Assim, os valores utilizados de $\lambda = 100, 1.000, 4.000$ e 10.000 (em picos por segundo) equivalem a um espaçamento médio de 10 ms, 1 ms, 0,25 ms e 10 ms.

Os resultados para o caso sem absorção estão mostrados na Fig. 3.16. Já os resultados para o caso com absorção estão mostrados na Fig. 3.17. O erro médio, como nos ruídos de Bernoulli e Poisson, é pouco influenciado pela concentração do ruído, exceto na faixa de frequência correspondente a 16 kHz. Ao contrário do que

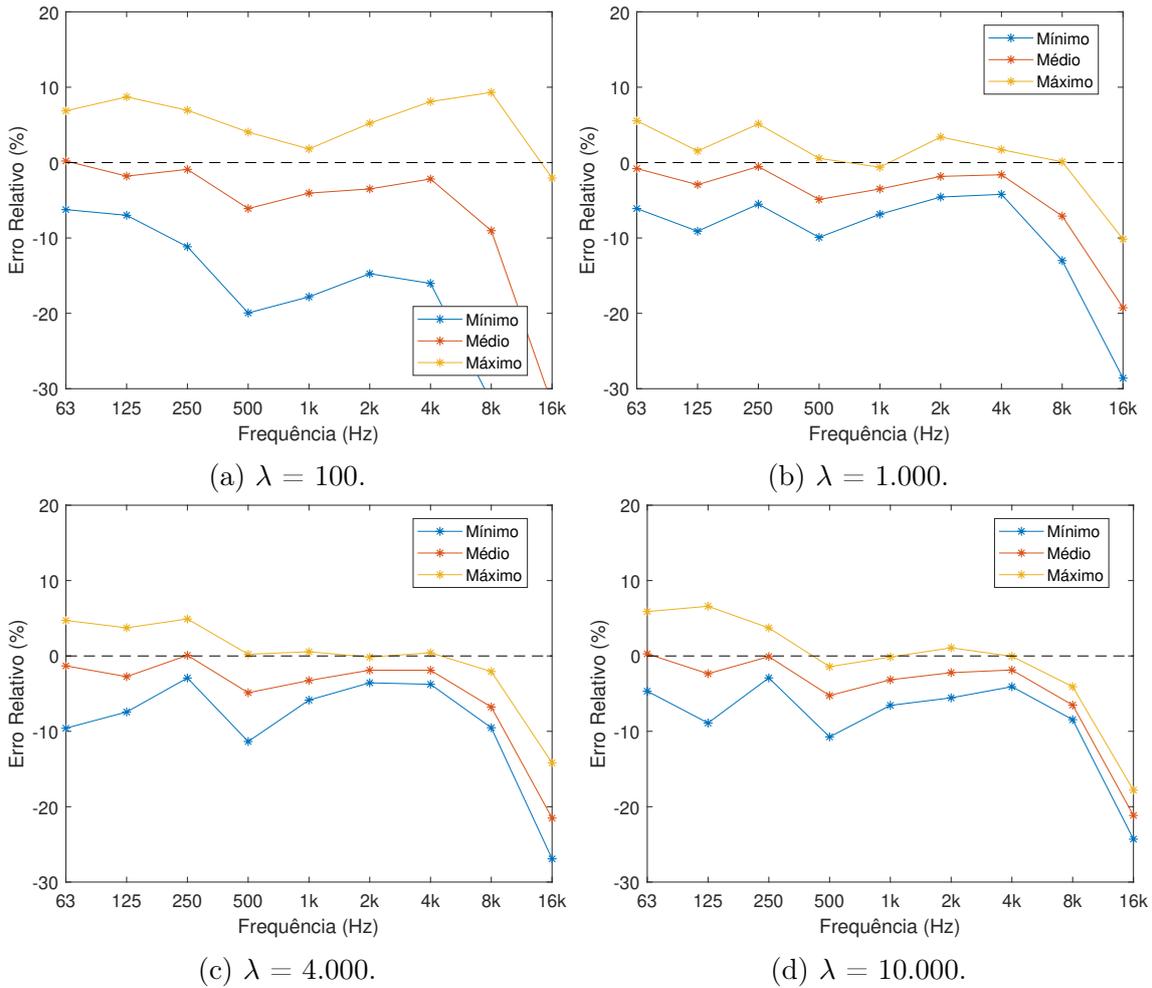


Figura 3.14: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Bernoulli para o caso sem absorção.

foi observado nos ruídos de Bernoulli e Poisson, a variabilidade observada no erro das estimativas do ruído Velvet aumenta conforme a concentração aumenta. Esse aumento, porém, não é considerável, sendo a faixa dinâmica do erro sempre inferior à 20%.

O ruído Velvet, ao contrário do ruído de Poisson e Bernoulli, foi projetado para que seu espectro de potência tivesse energia constante. Além disso, possui valores positivos e negativos, enquanto que os ruídos de Poisson e Bernoulli possuem apenas valores não-negativos. Essas características próprias devem ser levadas em consideração ao explicar as diferenças observadas nas simulações do ruído Velvet e dos demais ruídos.

3.3 Discussão dos Resultados

As simulações referentes a síntese da cauda acústica foram realizadas com duas categorias de ruído. Na primeira delas, com resultados apresentados nas Seções

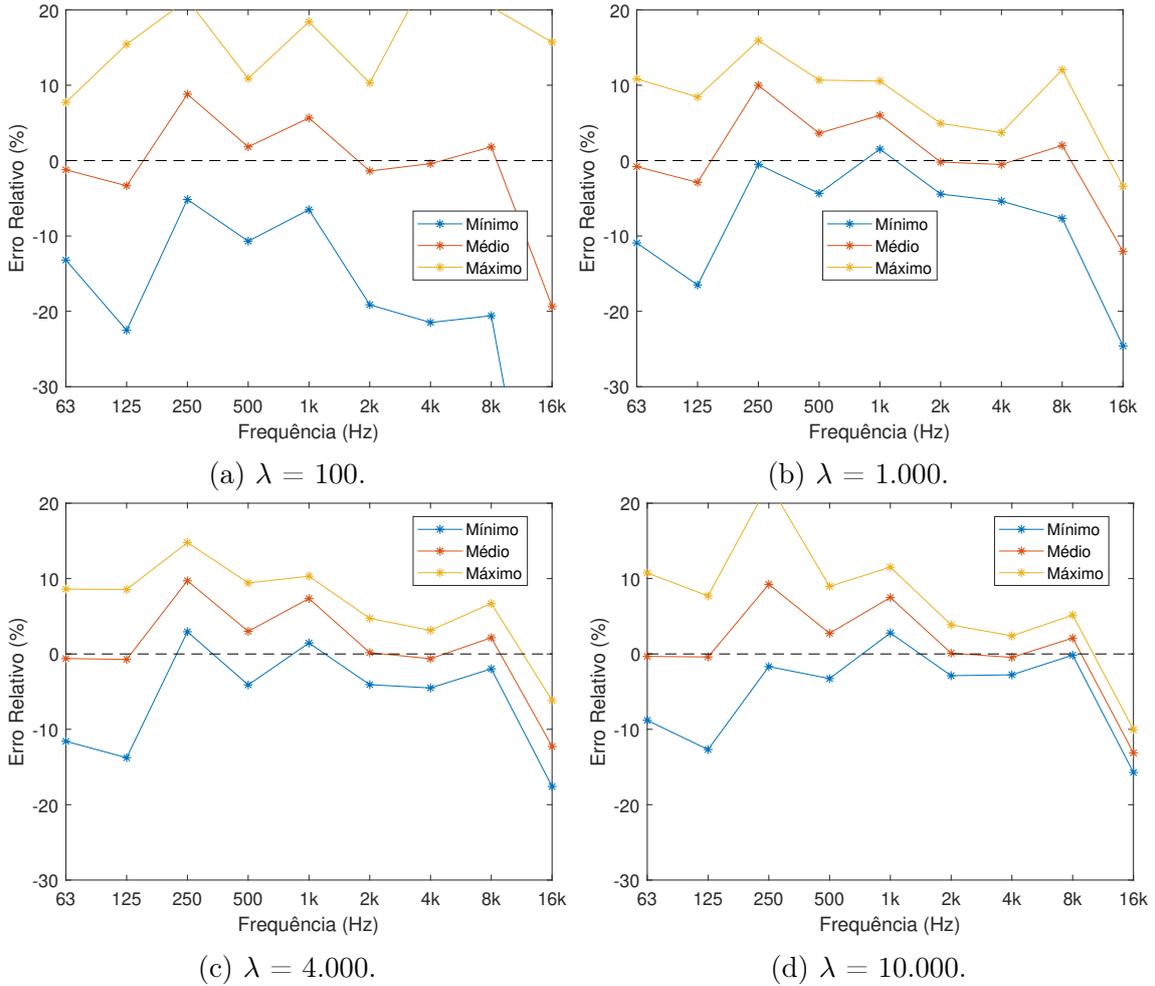


Figura 3.15: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Bernoulli para o caso com absorção.

3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, apenas as variância das distribuições geradoras do ruído foram alteradas. Já na segunda, com resultados apresentados nas Seções 3.2.4, 3.2.5 e 3.2.6, a concentração – medida em ocorrências/picos por segundo – pode ser controlada. Os limitantes máximo e mínimo dos erros observados para o tempo de reverberação em cada faixa de frequência são consideravelmente mais sensíveis à concentração do que à variância das distribuições e ruídos considerados.

Com relação ao primeiro grupo de distribuições, os resultados se mostraram parecidos e de uma maneira geral, pouco sensíveis à variância σ_X^2 . Os erros das simulações apresentaram maior variação nas baixas frequências – até 1 kHz – e maior valor – por volta de 30 % – na faixa de 8 kHz a 16 kHz. Este padrão observado no erro médio de todos os ruídos sugere que o ajuste do decaimento energético ainda pode melhorar. Embora os erros até a faixa de 8 kHz tenham sido em sua grande maioria inferiores a 10%, os resultados sugerem que o decaimento energético apresenta uma dinâmica mais complexa do que a indicada pela Eq. (3.1). Calcular o decaimento energético devido ao grau de complexidade é um problema que está

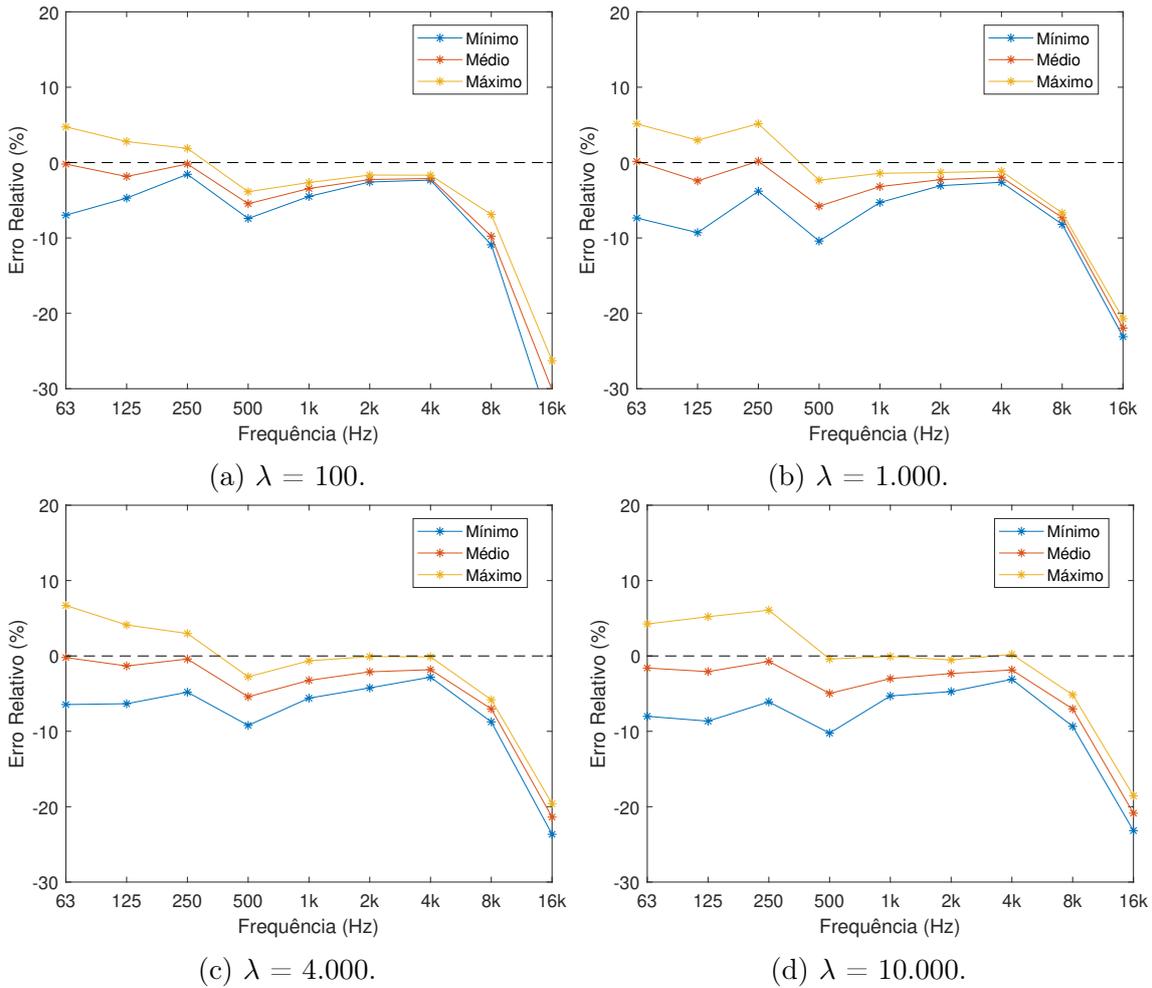


Figura 3.16: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Velvet para o caso sem absorção.

além do escopo deste trabalho. No processo de síntese da RIR, essa dificuldade é contornada estimando-se o seu decaimento a partir dos dados medidos.

Com relação ao segundo grupo de distribuições, as estimativas do T_{20} foram mais sensíveis ao parâmetro concentração. Os erros observados para os ruídos dependentes da concentração se aproximam dos erros observados no outro grupo quando λ é suficientemente alto – a partir de 4.000 picos por segundo. Com exceção do ruído Velvet, a variação das estimativas diminui com o aumento da concentração. Para este ruído as variações das estimativas aumentaram com λ . Este aumento, por sua vez, não foi considerável. A sensibilidade dos outros ruídos com relação à concentração é consideravelmente maior (em torno de 60%) do que a observada com o ruído Velvet.

O erro médio das simulações foi tomado como parâmetro para escolher o melhor ruído. Para cada ruído, calculou-se a média dos erros observados para as faixas de

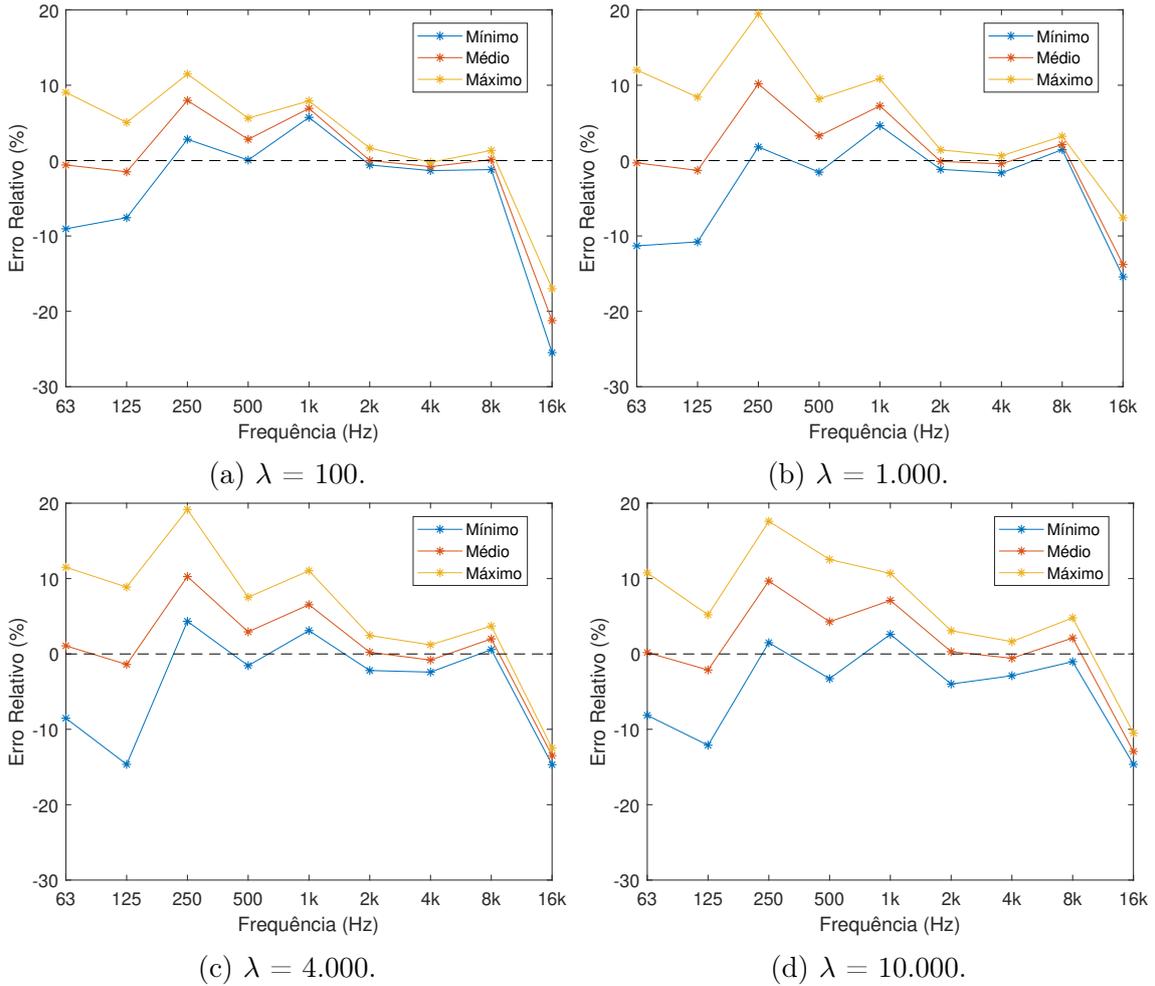


Figura 3.17: Erro do T_{20} da RIR sintetizada com ruído Velvet para o caso com absorção.

frequência de até 8 kHz, pela expressão

$$E_M = \sum_{b=1}^{N_B} \frac{E_r(b)}{N_B}, \quad (3.6)$$

onde $E_r(b)$ é o erro médio observado na sub-banda b e N_B é o número de sub-bandas consideradas – no caso, $N_B = 8$. A sub-banda 9 – correspondente à frequência central de 16 kHz – foi desconsiderada desta avaliação por apresentar consistentemente um erro mais alto do que as outras faixas. Esta discrepância, observada em todas as distribuições, sugere que o modelo da Eq. (3.1), proposto para o decaimento energético, não é o mais apropriado para este caso.

O ruído mais apropriado para caracterizar a cauda reverberante de uma sala, de acordo com o critério apresentado, é o que apresenta menor valor de E_M . Os valores de E_M para todas as distribuições e parâmetros são apresentados na Tabela 3.1. Para o caso sem absorção, o ruído Velvet com $\lambda = 4.000$ apresentou o menor erro, igual a 2,69%. Para o caso com absorção o ruído Velvet com $\lambda = 1.00$ apresentou o menor

erro, igual a 2,59%, muito próximo do segundo menor erro, igual a 2,86%, obtido com a distribuição de Bernoulli com $\lambda = 10.000$. Como o ruído Velvet apresentou o melhor ajuste à cauda reverberante para ambos os casos (com e sem absorção), será utilizado no método proposto para complementar a RIR obtida pelo traçado de raios.

Uma vez escolhido o tipo de ruído, falta determinar qual a densidade será utilizada, pois os melhores resultados foram obtidos com densidades diferentes para cada caso. Em [31], RIRs empregando o ruído Velvet com diferentes densidades foram sintetizadas. Para avaliar o efeito da densidade nas RIRs, foram empregados testes subjetivos. Foi verificado que o ruído Velvet é percebido como mais “suave” que o ruído branco Gaussiano quando apresenta uma densidade de, pelo menos, 2.000 picos por segundo. Na síntese da cauda reverberante, a “rigidez” observada no ruído Velvet com densidades abaixo de 1.000 picos por segundo são percebidas como “desconfortáveis” e, eventualmente, picos são identificados no meio do ruído – o que não é desejável [31]. Baseando-se nessas observações, foi adotado o ruído Velvet com $\lambda = 4.000$ para simular a cauda reverberante no método do traçado de raios.

Ruído	Parâmetro	Sem absorção		Com absorção	
		$E_M(\%)$	Ranking	$E_M(\%)$	Ranking
Bernoulli	$\lambda = 100$	3,47	15	3,06	6
	$\lambda = 1000$	2,89	6	3,25	14
	$\lambda = 4000$	2,86	4	3,04	5
	$\lambda = 10000$	2,72	3	2,86	2
Gauss	$\sigma_X^2 = 1$	5,18	18	3,04	4
	$\sigma_X^2 = 100$	2,89	5	3,11	8
Poisson	$\lambda = 100$	3,24	14	3,18	13
	$\lambda = 1000$	2,71	2	3,31	16
	$\lambda = 4000$	2,92	9	3,17	12
	$\lambda = 10000$	2,95	12	3,41	18
Rosa	$\sigma_X^2 = 1$	4,37	17	3,13	10
	$\sigma_X^2 = 100$	3,9	16	3,32	17
Uniforme	$\sigma_X^2 = 0,833$	2,94	10	3,00	3
	$\sigma_X^2 = 833$	2,91	8	3,11	7
Velvet	$\lambda = 100$	3,16	12	2,59	1
	$\lambda = 1000$	2,90	7	3,12	9
	$\lambda = 4000$	2,69	1	3,15	11
	$\lambda = 10000$	2,94	11	3,29	15

Tabela 3.1: Resultados consolidados das simulações para os casos com e sem absorção.

Capítulo 4

Incorporação da Cauda Reverberante Sintetizada à Resposta Simulada

Durante a execução do método de traçado de raios, uma grande quantidade de raios é disparada da fonte em diversas direções e coletados no receptor. A energia e os instantes de tempo dos raios que chegam ao receptor são registrados e empregados no cálculo da resposta ao impulso. A “qualidade da simulação”, ou o quão próximo o resultado obtido se aproxima da situação real, de uma maneira geral depende de três fatores: a quantidade de raios utilizada, a distância da fonte ao receptor e a geometria do receptor.

Naturalmente, quanto maior a quantidade de raios, melhor será o resultado da simulação. O percentual p de raios que atingirá um receptor esférico de raio R , cujo centro encontra-se a uma distância d da fonte, é dado por

$$p = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}} \right). \quad (4.1)$$

Assim, a quantidade média de raios que atingem o receptor a uma distância d é igual a pN , onde N é o número de raios empregado na simulação.

A partir de uma certa distância da fonte, a quantidade de energia no receptor não será mais inversamente proporcional à distância ao quadrado, característico da propagação esférica. Isso ocorre quando a quantidade de raios (pN) é igual ou menor que 1. Assim, dois casos são possíveis: apenas um raio atinge o receptor, com energia E/N onde E é a energia da fonte, ou nenhum raio atinge o receptor. O nível “real” de energia, em ambos os casos estará errado, pois o decaimento energético é desconsiderado. Essa distância, definida nesse trabalho como “Distância Efetiva”, pode ser calculada a partir da Eq. (4.1). Fazendo $p = 1/N$, ou seja, a probabilidade

de chegar ao menos 1 raio no receptor, tem-se da Eq. (4.1) que

$$N = \frac{2\sqrt{d^2 + R^2}}{\sqrt{d^2 + R^2} - d}. \quad (4.2)$$

Para uma simulação com 20.000 raios, a distância crítica é de aproximadamente 30 m. Considerando a velocidade do som no ar igual a aproximadamente 340 m/s, a distância efetiva corresponde a uma propagação de 80 ms.

Na prática, o erro observado na simulação do traçado de raios começa a aumentar antes da distância crítica. É possível que, simplesmente, não cheguem raios suficientes no receptor para que a energia simulada se iguale à medida. Assim, para conseguir uma estimativa confiável da cauda reverberante, justamente por ser a parcela final da IR, são necessários muitos raios, o que resulta em um tempo consideravelmente maior de simulação. Ou seja, intuitivamente, a simulação deve ser projetada para que a distância crítica seja “muito maior” do que a duração da IR.

Neste trabalho, é apresentada uma possível solução para esse problema, onde a cauda reverberante é calculada a partir de um modelo estatístico, compensando, dessa forma, o elevado custo computacional do método do traçado de raios para estimá-la. O traçado de raios, no método proposto, é empregado apenas para calcular o som direto e as reflexões iniciais, enquanto que a cauda reverberante é sintetizada de acordo com o procedimento indicado no Capítulo 3. O custo computacional da implementação do traçado de raios combinado com a geração da cauda sintética é menor do que a simulação do traçado de raios para calcular toda a extensão da IR. Neste capítulo e no Capítulo 5 será avaliada a qualidade da estimativa gerada em cada caso.

Uma vez definida que a resposta do método é composta por traçado de raios e cauda sintética, é necessário definir onde “termina” o traçado de raios e onde “começa” a cauda sintética. Nas simulações deste capítulo foram empregados diferentes valores para esse ponto de junção.

Para avaliar do método, foi empregada uma cauda reverberante sintetizada com ruído Velvet e $\lambda = 4.000$ picos por segundo. O início da cauda, ou seja o instante onde se deixa de utilizar o traçado de raios e começa a cauda sintetizada, foi calculado a partir da energia do traçado de raios. Quando a energia acumulada deixa de “crescer significativamente”, em teoria, há um indício de que a cauda reverberante deveria começar. Na falta de um critério universal para avaliar este instante de tempo, as simulações foram feitas para quatro instantes distintos.

Como o principal objetivo do método proposto é ganhar eficiência computacional em relação ao método do Traçado de Raios tradicional, utilizou-se como critério de parada a ordem máxima de reflexão, evitando que haja centenas de reflexões de um mesmo raio. Durante a simulação, um raio com mais reflexões do que um

determinado número tem seu percurso interrompido e outro raio é lançado. Na falta de uma regra que garanta o “mínimo de reflexões necessárias” para que a simulação esteja correta, o método proposto foi avaliado em simulações com diferentes ordens de reflexão.

Além do critério de parada, outro parâmetro fundamental que deve ser considerado no traçado de raios é a quantidade de raios utilizada na simulação. Em todos os casos analisados foram empregados 20.000 raios, por esse número ser suficiente para conseguir uma boa estimativa para o som direto e para as reflexões iniciais, além da simulação ficar relativamente rápida em um computador pessoal. Quantidades maiores de raios aumentam consideravelmente o custo computacional, não sendo vantajoso para o método proposto em que apenas o início da IR estimada precisa ser estimado com precisão.

Para evitar descontinuidades na transição entre as 2 partes da IR resultante, a cauda sintética foi escalada, energeticamente, em função do início da resposta. Mais especificamente, uma vez determinado o instante em que a cauda será incorporada a IR, a energia da resposta obtida com o traçado de raios é calculada no entorno desse instante e a cauda é ajustada para que no seu início apresente essa mesma energia. Como referência, foi tomada uma janela de 10 ms, ou 441 amostras, para se calcular a energia.

Os parâmetros acústicos das IRs final e medida foram comparados para diferentes valores de “início” da cauda e ordem máxima de reflexões empregada no traçado de raios. A melhor combinação desses parâmetros foi avaliada para a mesma sala de referência do Capítulo 3, nos dois casos: com e sem absorção. Uma vez que a parte inicial da IR foi utilizada, outros parâmetros acústicos foram avaliados, além do tempo de reverberação considerado no Capítulo 3: a clareza (C_{50} , C_{80}), a definição (D_{50} , D_{80}) e o tempo central (T_c).

4.1 Metodologia para Mesclagem da Cauda Reverberante

Nesta seção, o método de mesclagem da cauda reverberante é descrito em maiores detalhes a partir de ilustrações e exemplos. Na Fig. 4.1 são mostradas as IRs de referência utilizadas neste capítulo.

Na Fig. 4.2 encontram-se os resultados de simulações obtidos pelo método do traçado de raios. Para esta simulação foram empregados 20.000 raios e a ordem máxima de reflexão foi igual a 3, ou seja, apenas raios que não tenham sofrido mais do que 3 reflexões ao atingir o receptor foram considerados no cálculo da IR.

Em seguida, o início da cauda sintética deve ser determinado para cada sub-

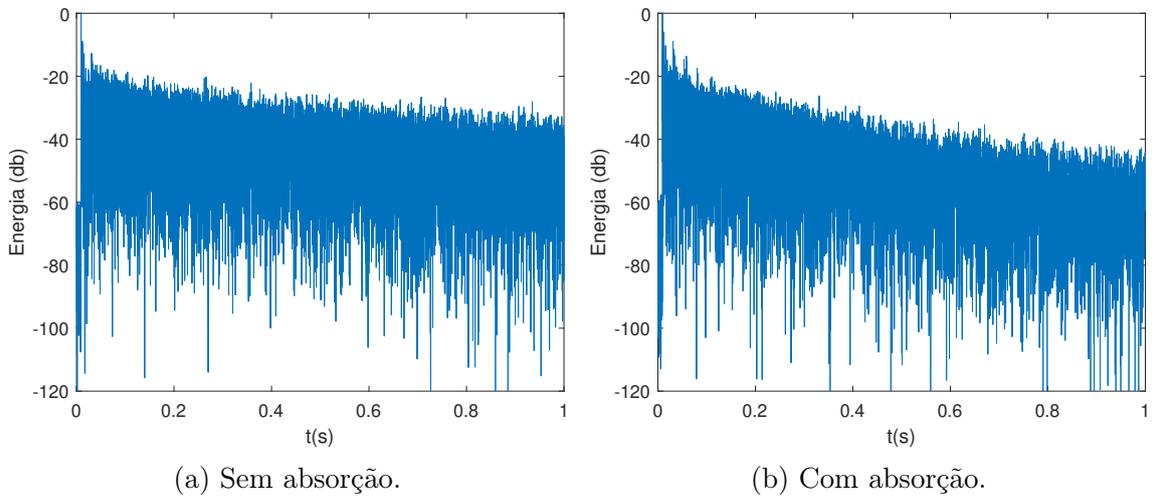


Figura 4.1: IRs medidas na sala descrita na Fig. 3.1.

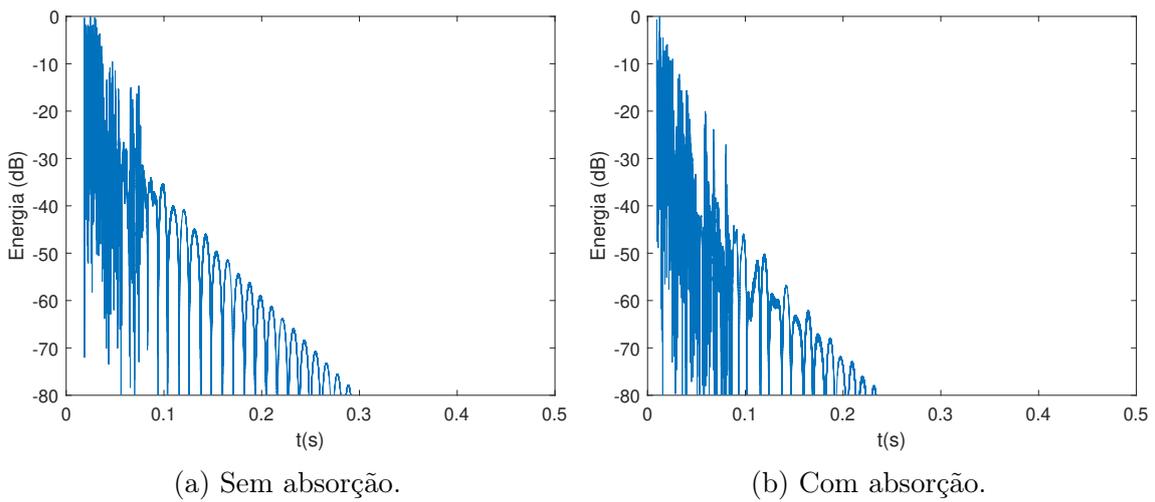


Figura 4.2: IRs simuladas pelo traçado de raios para a sala da Fig. 3.1.

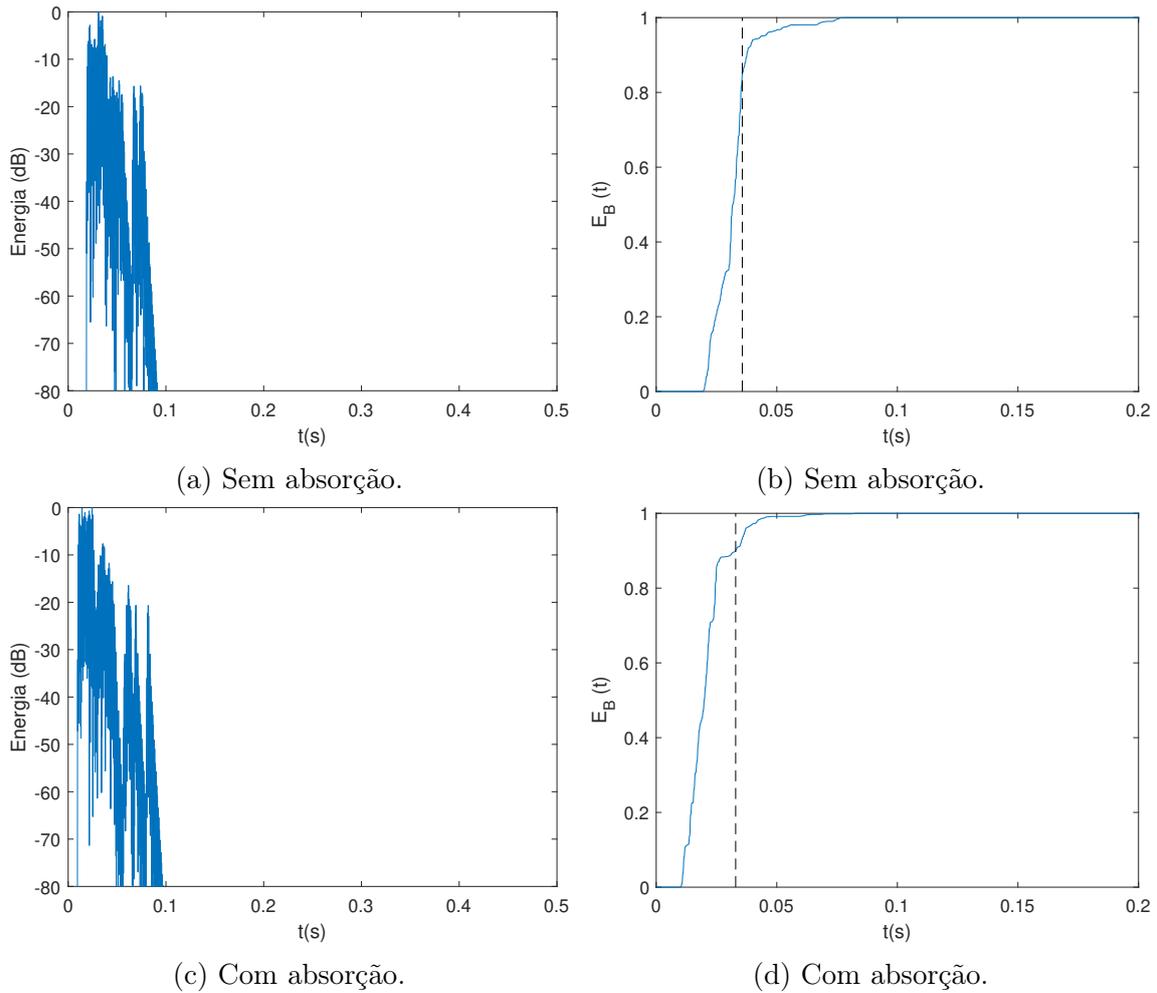


Figura 4.3: Simulação do traçado de raios para a sala da Fig. 3.1 na faixa de 1kHz para os 2 casos considerados: com e sem absorção – (a) e (b) – e a energia acumulada de cada série em (c) e (d), respectivamente.

banda. Na Fig. 4.3 estão as IRs simuladas para a faixa de 1 kHz e a energia cumulativa correspondente. Nessa figura, foi destacado o ponto onde a simulação atinge 90% da energia total. Esse patamar é arbitrário e os resultados finais serão avaliados para diferentes percentuais de energia.

Na Fig.4.4 estão mostradas as caudas reverberantes sintetizadas na faixa de frequência em torno de 1 kHz e com o seu início demarcado.

Nas Figs. 4.5 e 4.6, o decaimento energético é comparado para as diferentes séries – medida, obtida pelo traçado de raios, e resposta final mesclada – para os casos sem e com absorção, respectivamente. As faixas de frequência utilizadas foram 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz.

A Fig. 4.7 mostra o resultado final do método, obtido somando-se as respostas de cada sub-banda, para os casos sem e com absorção.

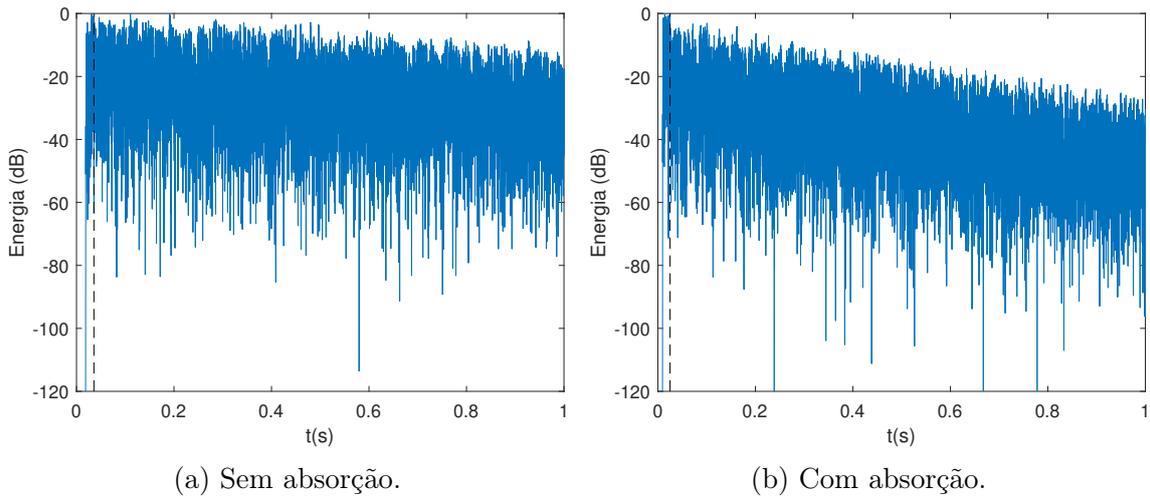


Figura 4.4: Cauda artificial para frequências em torno de 1 kHz.

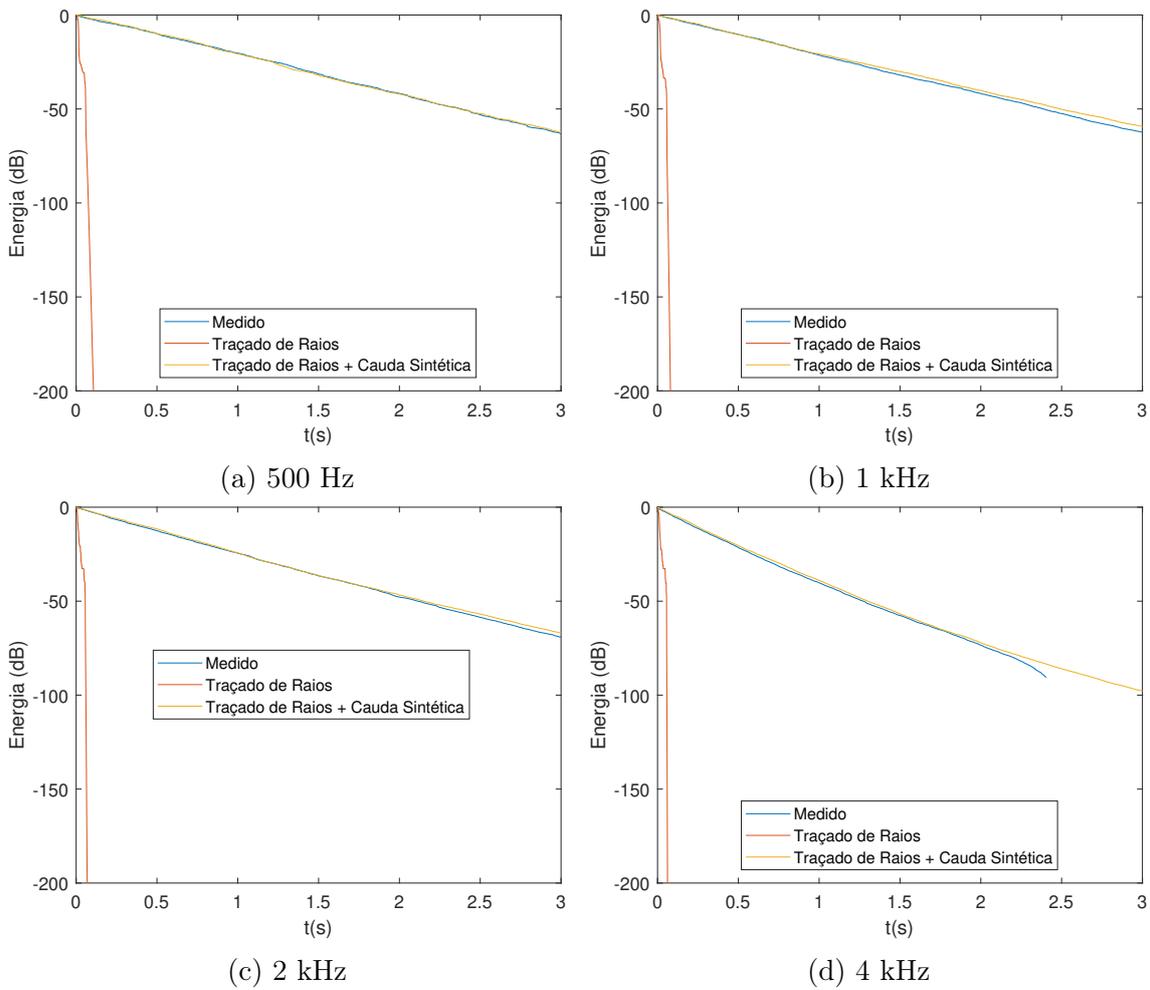


Figura 4.5: Comparação do decaimento energético nas diferentes faixas de frequência para o caso sem absorção.

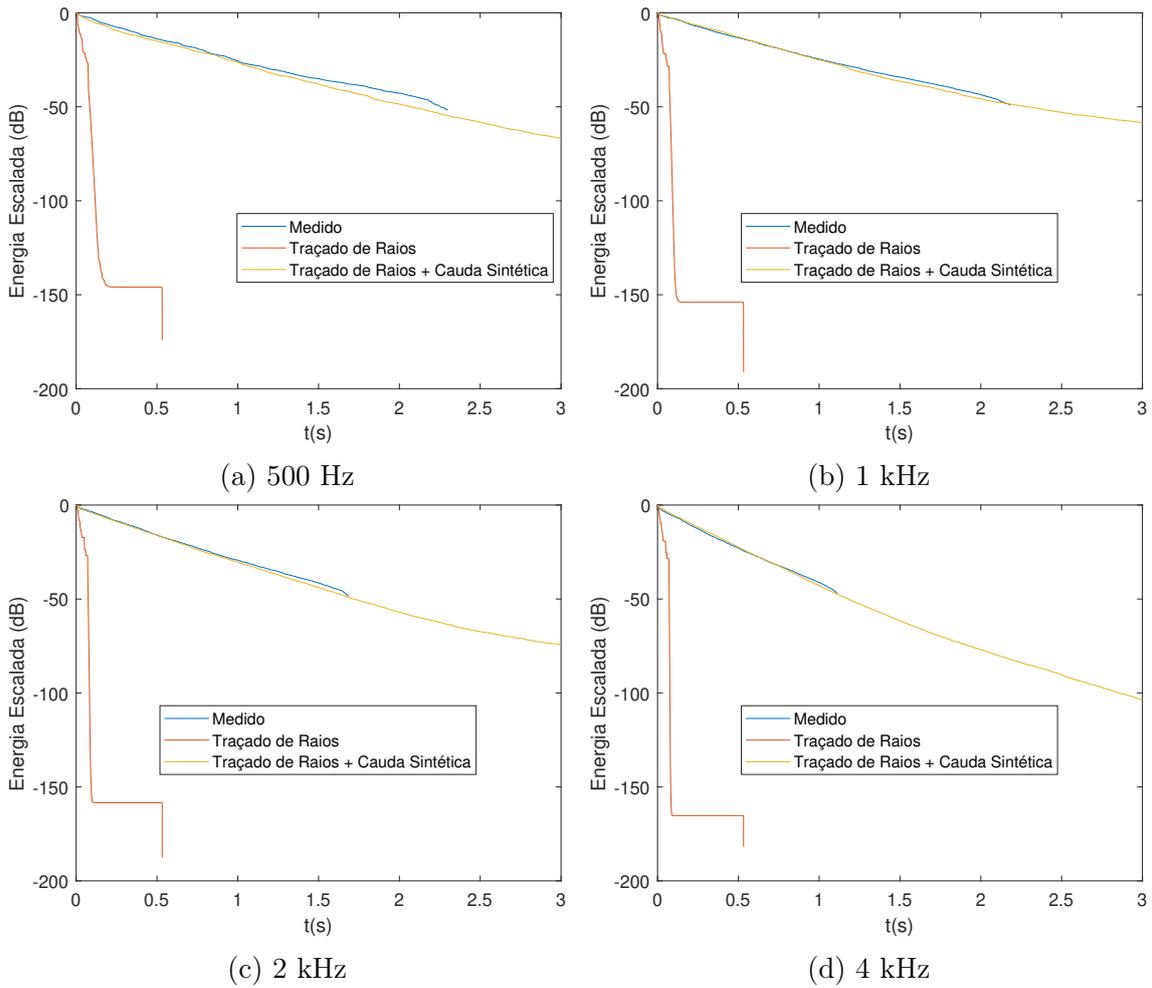


Figura 4.6: Comparação do decaimento energético nas diferentes faixas de frequência para o caso com absorção.

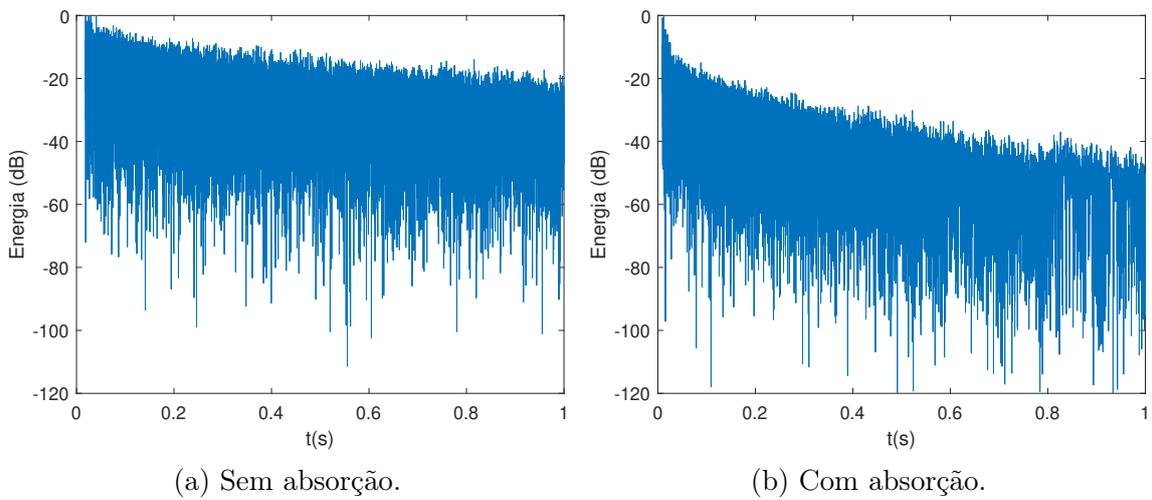


Figura 4.7: Resultado final do processo: IR simulada e cauda reverberante sintetizada.

4.2 Determinação do Instante de Mesclagem

Para determinar o instante em que a cauda reverberante deve ser concatenada à resposta obtida pelo traçado de raios, foi utilizada a energia cumulativa normalizada da IR por faixa de frequência. Para cada sub-banda, esta grandeza foi calculada por

$$E_b(t) = \frac{\int_0^t \hat{h}_b^2(\tau) d\tau}{\int_0^{+\infty} \hat{h}_b^2(\tau) d\tau}, \quad (4.3)$$

onde $\hat{h}_b(t)$ é a estimativa da IR obtida pelo traçado de raios e $E_b(t)$ é a energia cumulativa normalizada no instante t , todos relativos à sub-banda b .

Em seguida, o início da cauda reverberante foi determinado como o instante de tempo em que $E_b(t)$ alcança um dado patamar como indicado na Equação 4.4

$$t_b = \underset{t}{\operatorname{argmin}} \|E_b(t) - E_L\|, \quad (4.4)$$

onde t_i é o início da cauda reverberante (em segundos) e E_L é o limiar que está sendo tomado como referência com $E_L \in [0, 1]$.

Após esse instante de tempo, a aproximação da IR obtida pelo traçado de raios é descartada e substituída pela cauda sintetizada, corrigindo a energia que falta. Os patamares empregados nas simulações foram: 60%, 75%, 85% e 95%. Ou seja, para o primeiro caso, o tempo inicial da cauda reverberante é obtido resolvendo a Eq. (4.4) para $E_L = 0, 60$. Além dos patamares de energia, foram utilizados os seguintes valores para a ordem máxima das reflexões no método do traçado de raios: 3, 5, 7 e 10. O intervalo de tempo usado para igualar as energias do início e do fim da IR foi mantido constante em todos os casos, igual a 10 ms.

Para as 16 possíveis combinações, obtidas dos 4 valores do patamar que define o início da cauda e dos 4 valores da ordem das reflexões dos raios, os parâmetros acústicos foram avaliados em 30 realizações da cauda reverberante – sintetizada com ruído Velvet e $\lambda = 4.000$. O erro médio de cada parâmetro avaliado foi calculado fazendo-se a média dos erros, em relação ao parâmetro da IR medida, obtidos em cada sub-banda para cada realização da cauda reverberante.

Para os parâmetros que já estão em valores relativos, Definição (D_{50} e D_{80}) e Clareza (C_{50} e C_{80}), foi tomada a diferença entre as grandezas medida e estimada como referência. Já para os parâmetros relacionados ao tempo (T_C e T_{20}), foi utilizado o erro relativo. As Eqs. (4.5) e (4.6) representam as medidas de erro tomadas como referência:

$$\bar{E}_A(E_L, O_M) = \frac{1}{30} \sum_{l=1}^{30} (x - \hat{x}_l) \quad (4.5)$$

e

$$\bar{E}_R(E_L, O_M) = \frac{1}{30} \sum_{l=1}^{30} \frac{(x - \hat{x}_l)}{x}, \quad (4.6)$$

onde x é o parâmetro medido e \hat{x} é o parâmetro estimado para a l -ésima realização da cauda reverberante. As variáveis t_i e O_M são, respectivamente, o instante de início da cauda e a ordem máxima utilizada na simulação do traçado de raios. Por simplicidade foi omitido o indicativo de qual sub-banda está sendo considerada.

Os parâmetros acústicos tomados como referência (obtidos da IR medida) estão mostrados nas Figs. 4.8 e 4.9. Na Fig. 4.8 estão as medições para o caso sem absorção, enquanto que na Fig. 4.9 estão as medições para o caso com absorção. O tempo de reverberação foi omitido, pois já foi mostrado na Fig. 3.2.

4.3 Resultados das Simulações

As simulações foram realizadas de maneira a avaliar o instante de tempo apropriado para mesclar a cauda reverberante à resposta da simulação do traçado de raios. Os resultados estão dispostos com o objetivo de destacar as mudanças na qualidade da resposta – aqui definida como o erro entre cada parâmetro acústico da IR medida e da simulada – de acordo com os diferentes instantes de início da cauda e parâmetros de simulação do traçado de raios. Na Seção 4.4, os resultados são avaliados e discutidos em detalhes.

A sala tomada como referência está indicada na Fig. 3.1 para a sala com e sem absorção. O erro, seja relativo ou absoluto, em cada configuração (t_i, O_M) , foi calculado para cada sub-banda como indicado nas Eqs. (4.5) e (4.6).

Na Fig. 4.10, encontram-se os erros obtidos para cada limiar energético para todas as sub-bandas no caso sem absorção, empregando ordem máxima de reflexão 3. Os tempos iniciais da cauda reverberante utilizados nas simulações da Fig. 4.10 estão mostrados na Fig. 4.18 (a) para os diferentes valores de E_L .

De maneira análoga, nas Figs. 4.12, 4.14 e 4.16, encontram-se os resultados obtidos utilizando no máximo 5, 7 e 10 reflexões, respectivamente, no método do traçado de raios. Os respectivos tempos de início da cauda reverberante, para cada sub-banda e diferentes valores de E_L , encontram-se nas Figs. 4.18 (b)-(d).

Esse procedimento foi repetido para o caso com absorção. Os resultados das simulação encontram-se nas Figs. 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17, onde as respectivas ordens máximas utilizadas foram 3, 5, 7 e 10. O início de cada cauda reverberante está mostrado na Fig. 4.19.

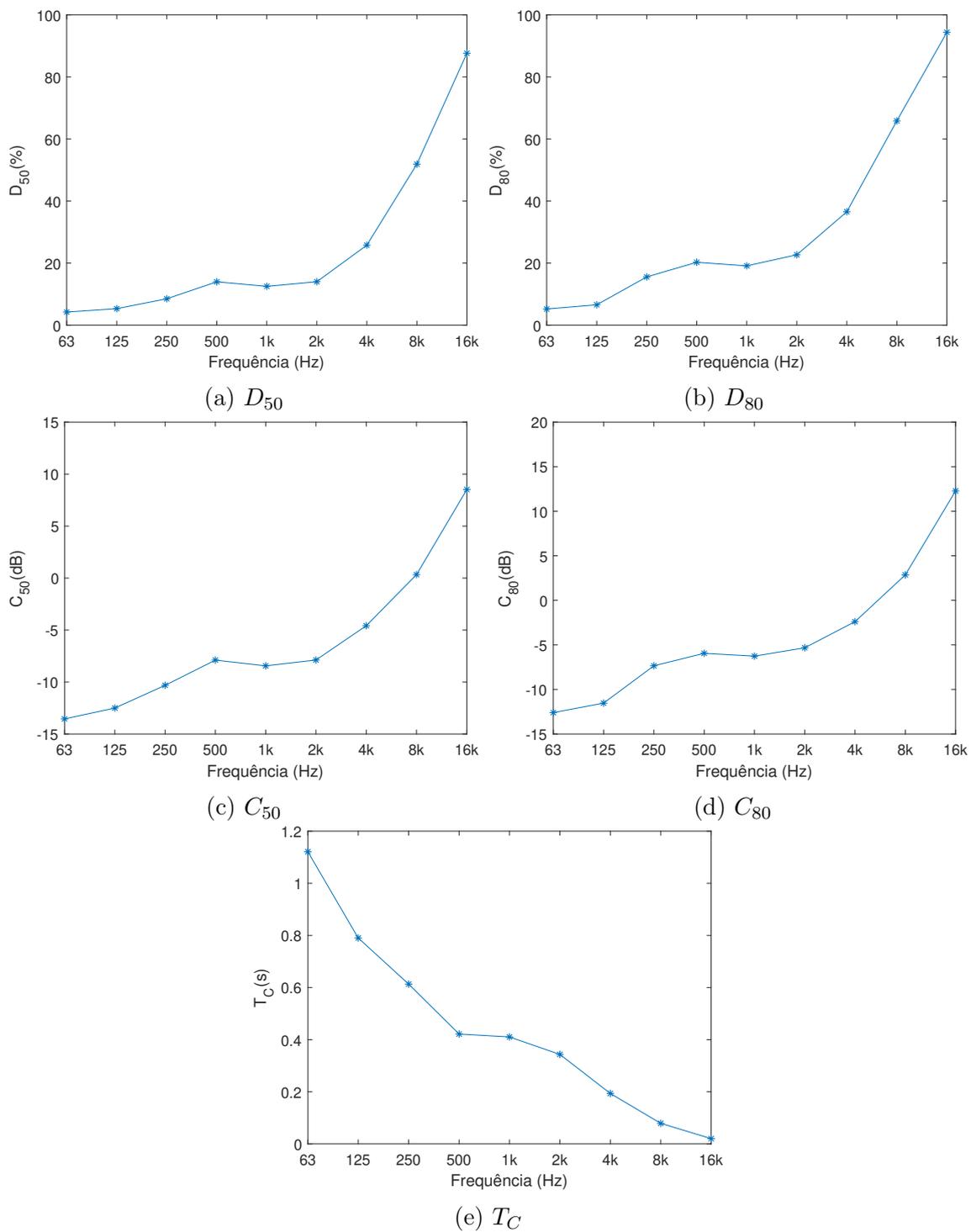


Figura 4.8: Medições dos parâmetros de qualidade acústica para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1.

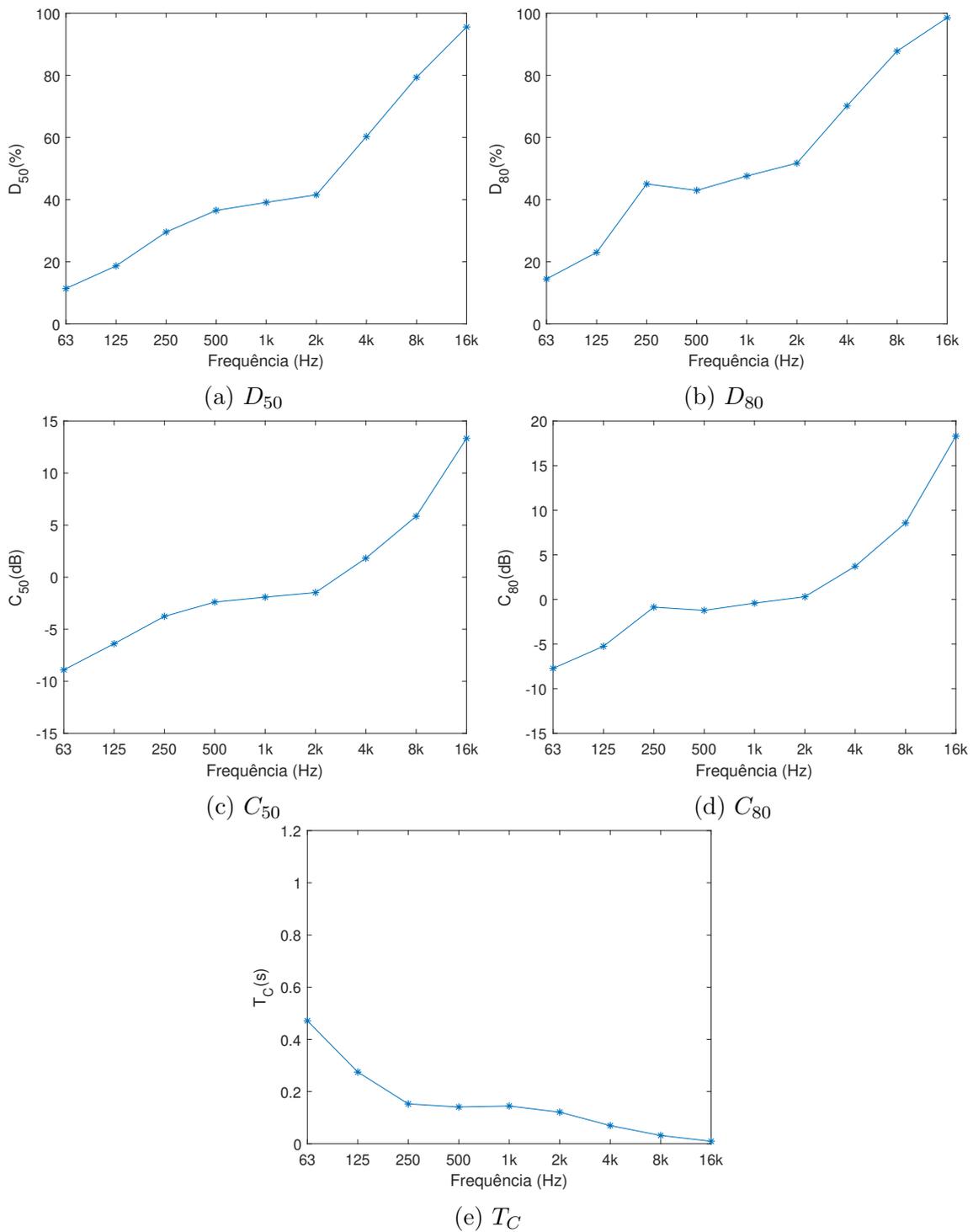


Figura 4.9: Medições dos parâmetros de qualidade acústica para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1.

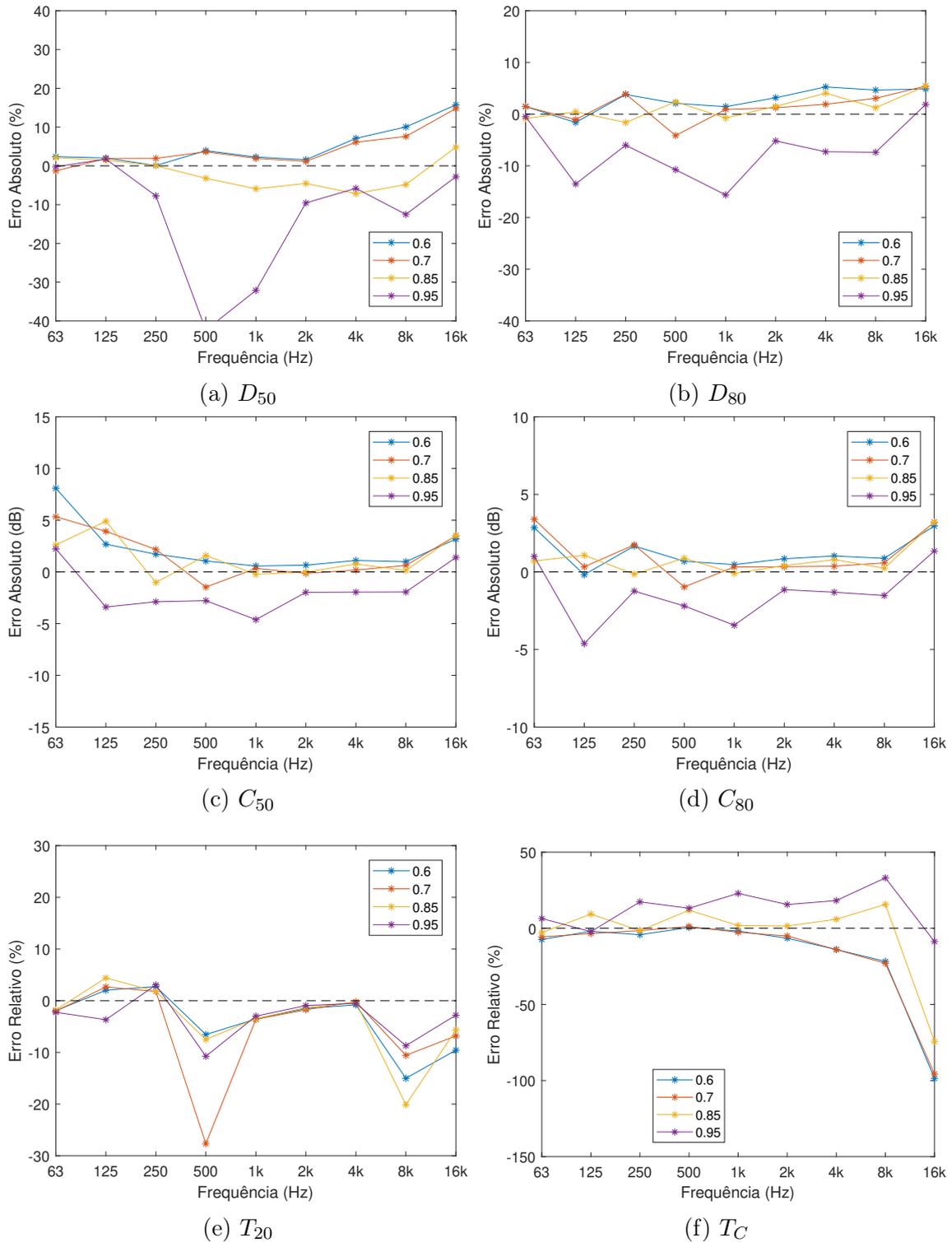


Figura 4.10: Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 3.

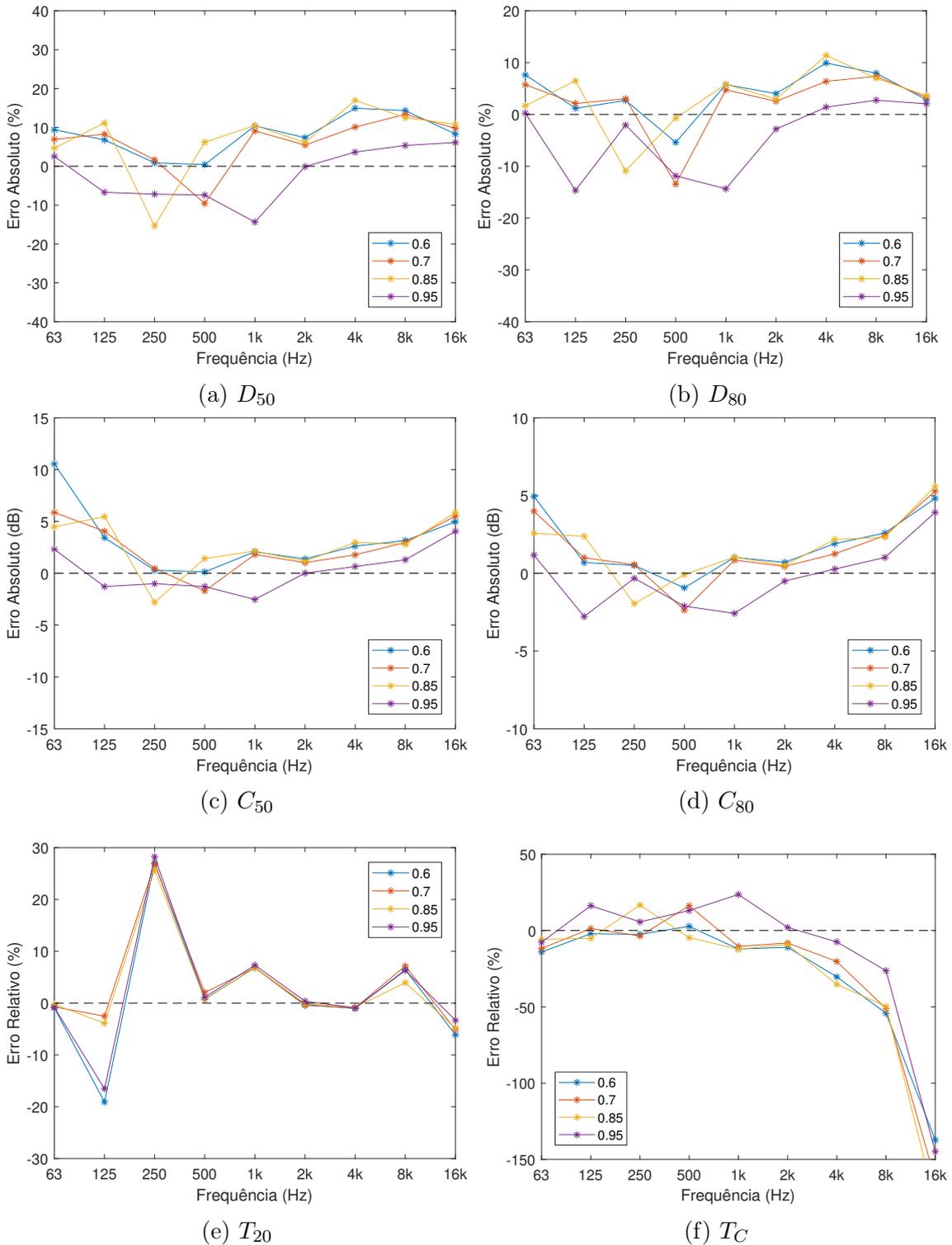


Figura 4.11: Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 3.

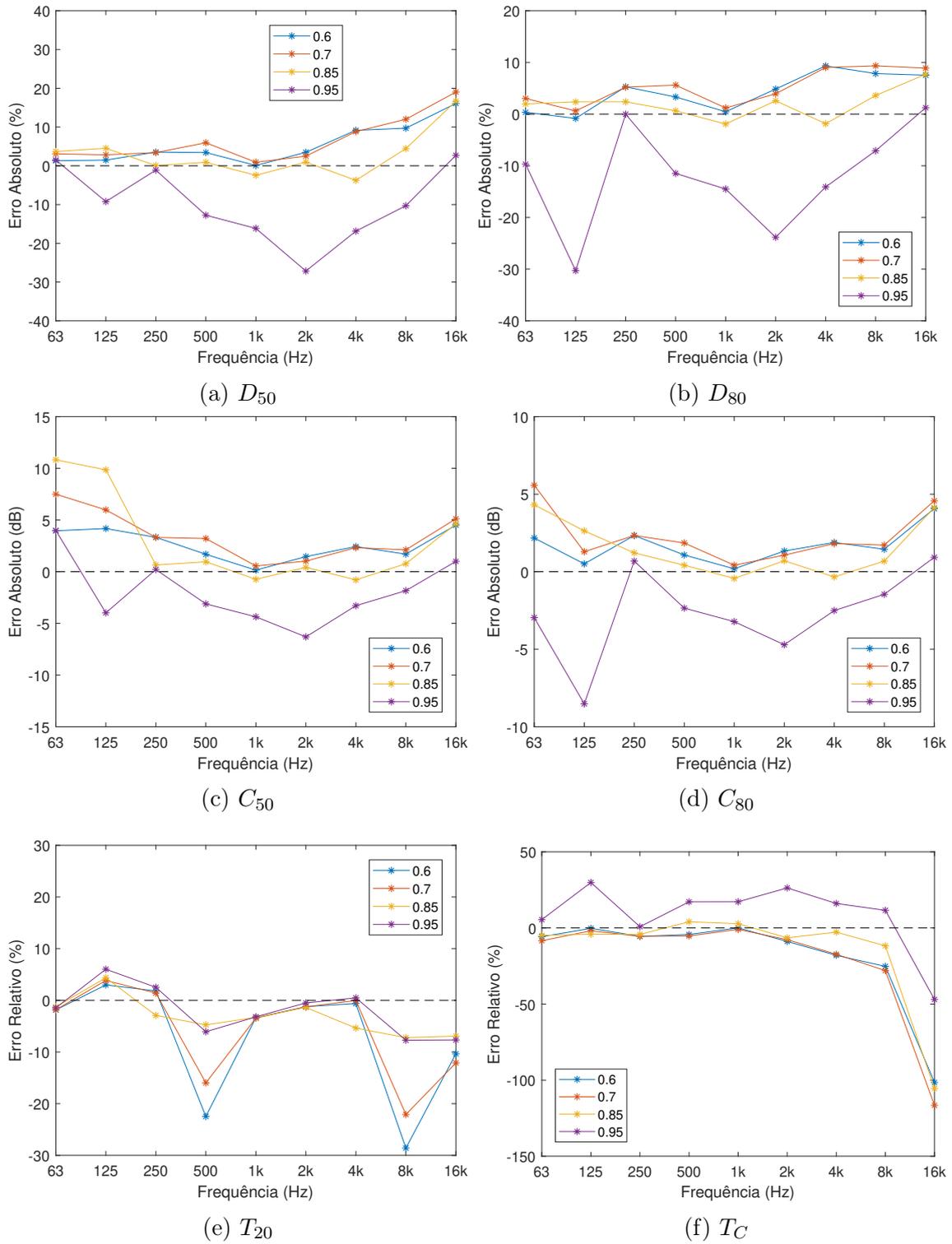


Figura 4.12: Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 5.

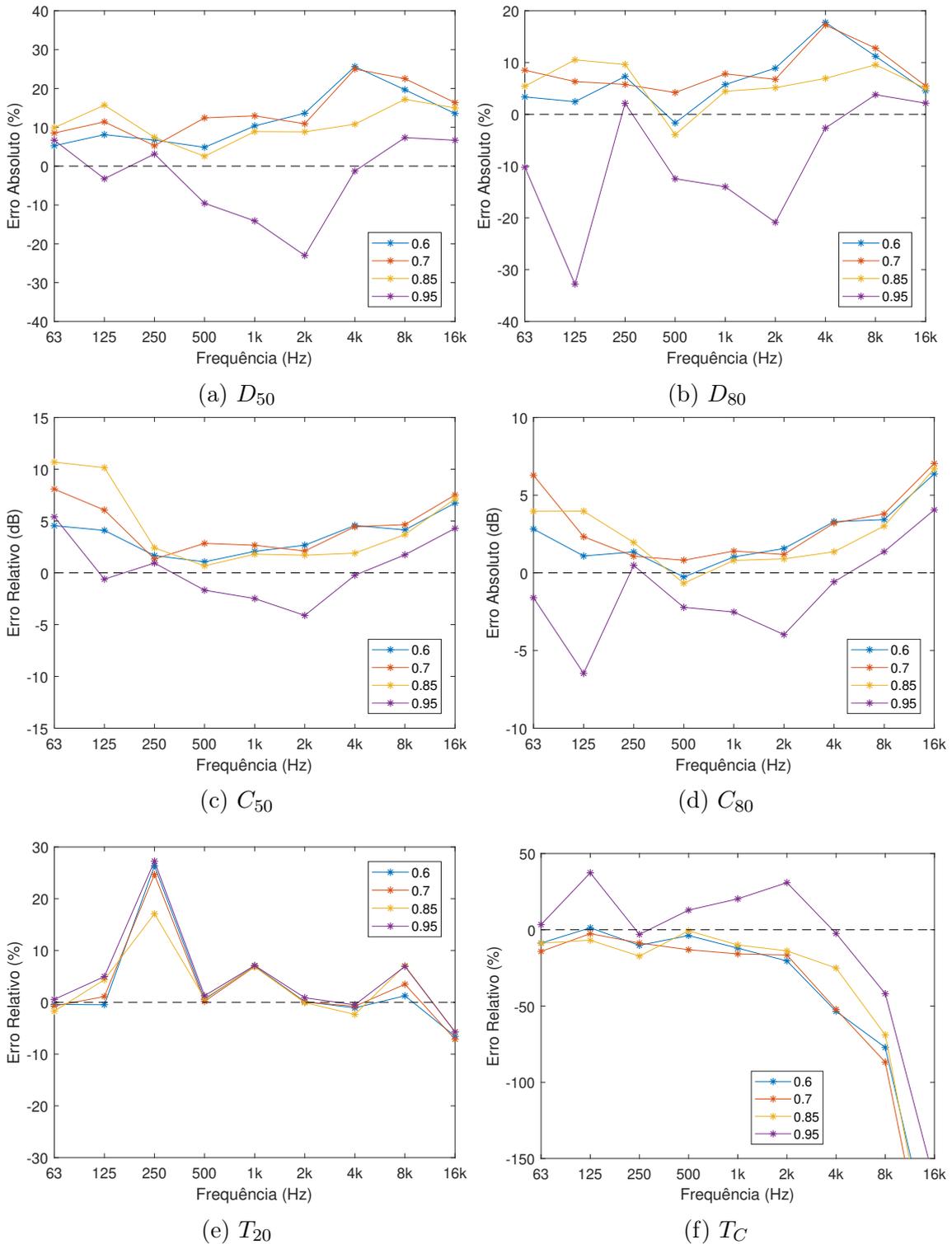


Figura 4.13: Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 5.

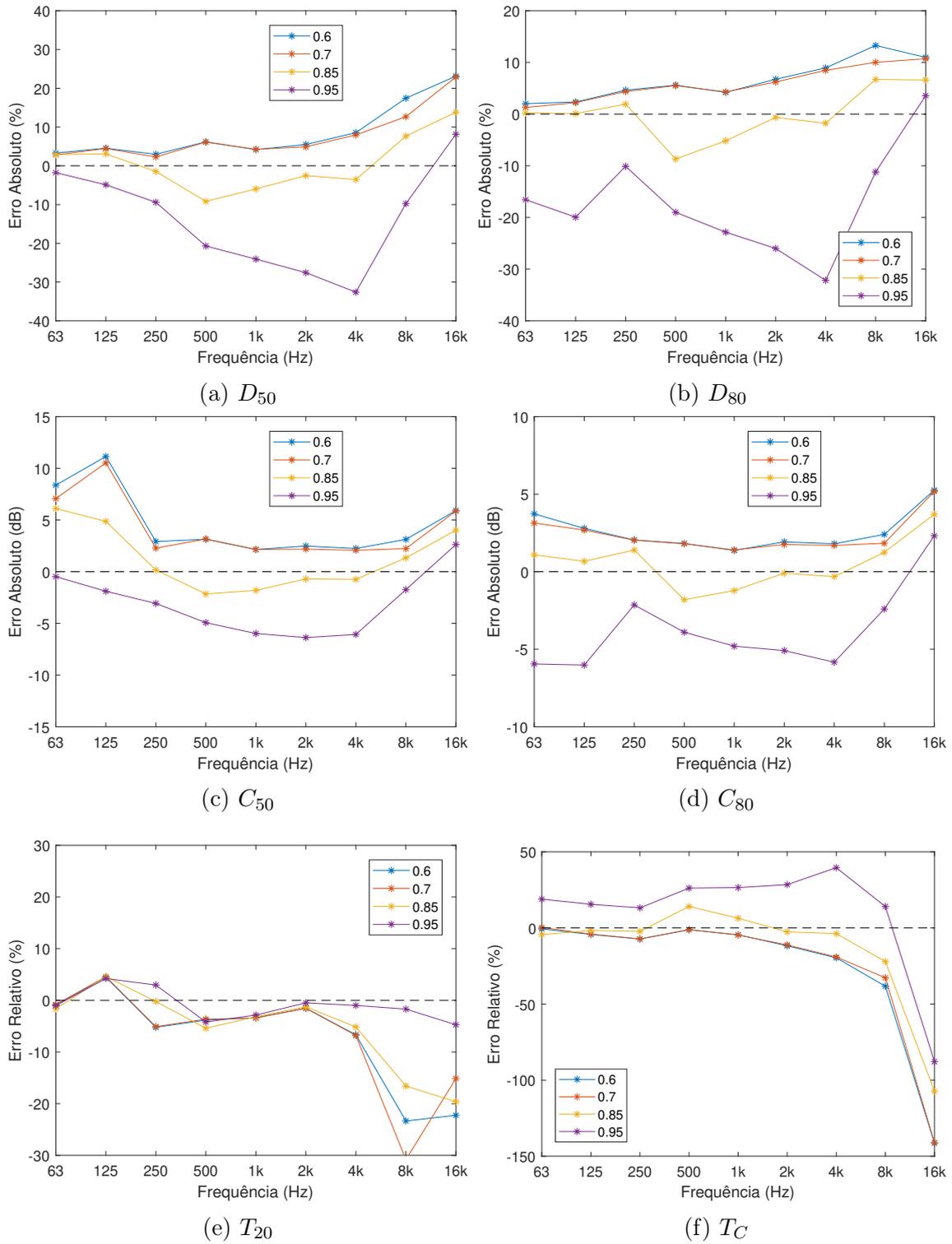


Figura 4.14: Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 7.

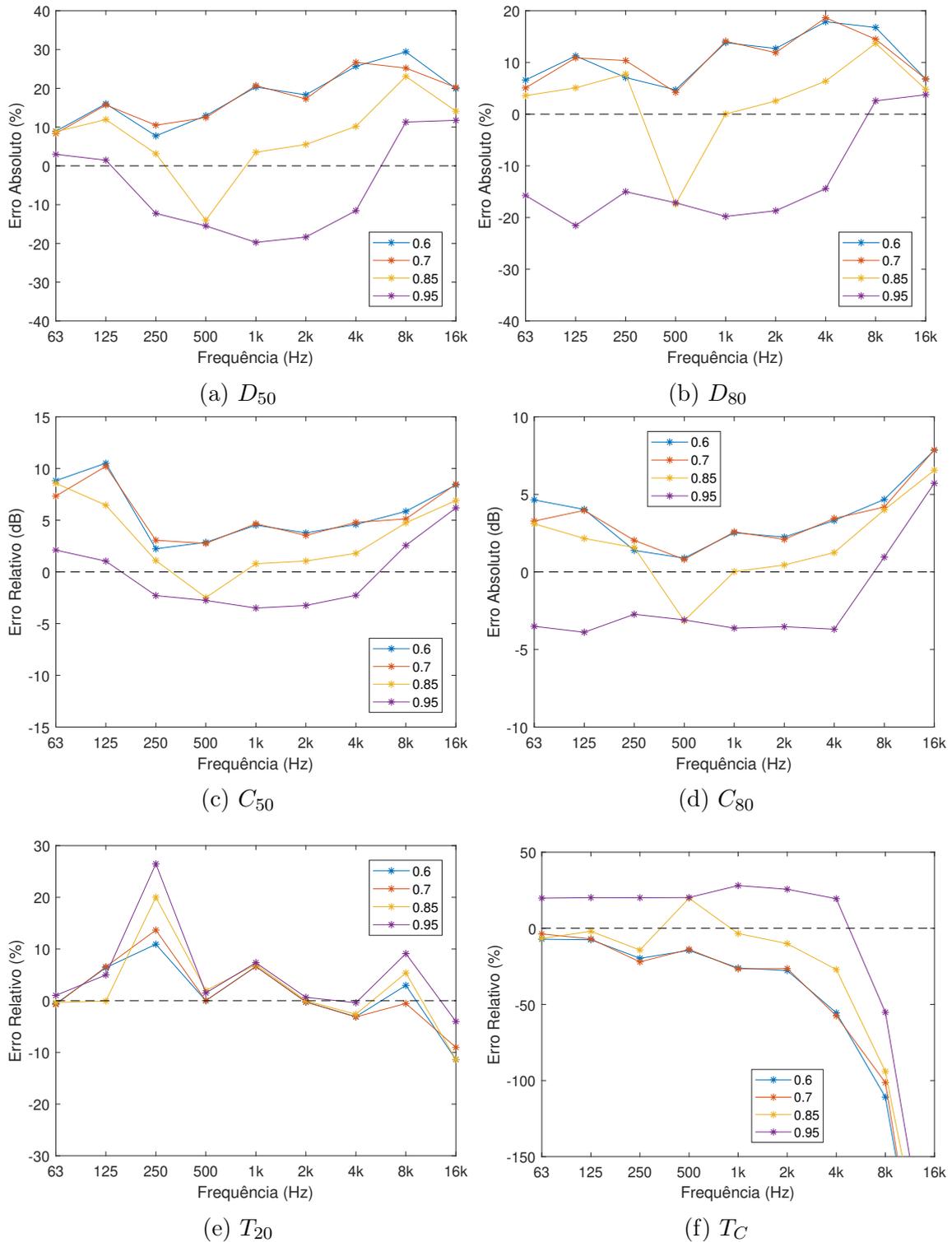


Figura 4.15: Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 7.

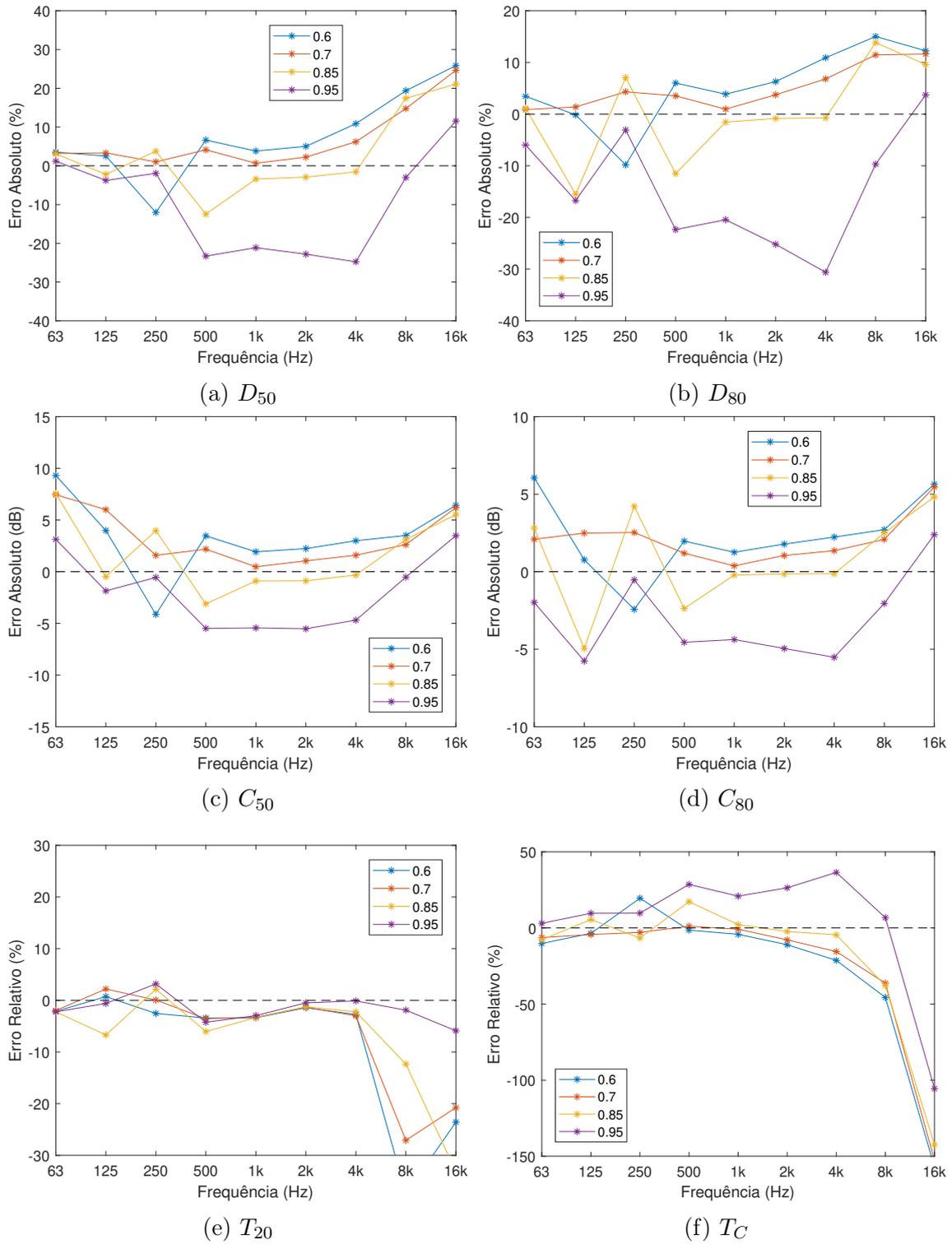


Figura 4.16: Erros dos parâmetros acústicos para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 10.

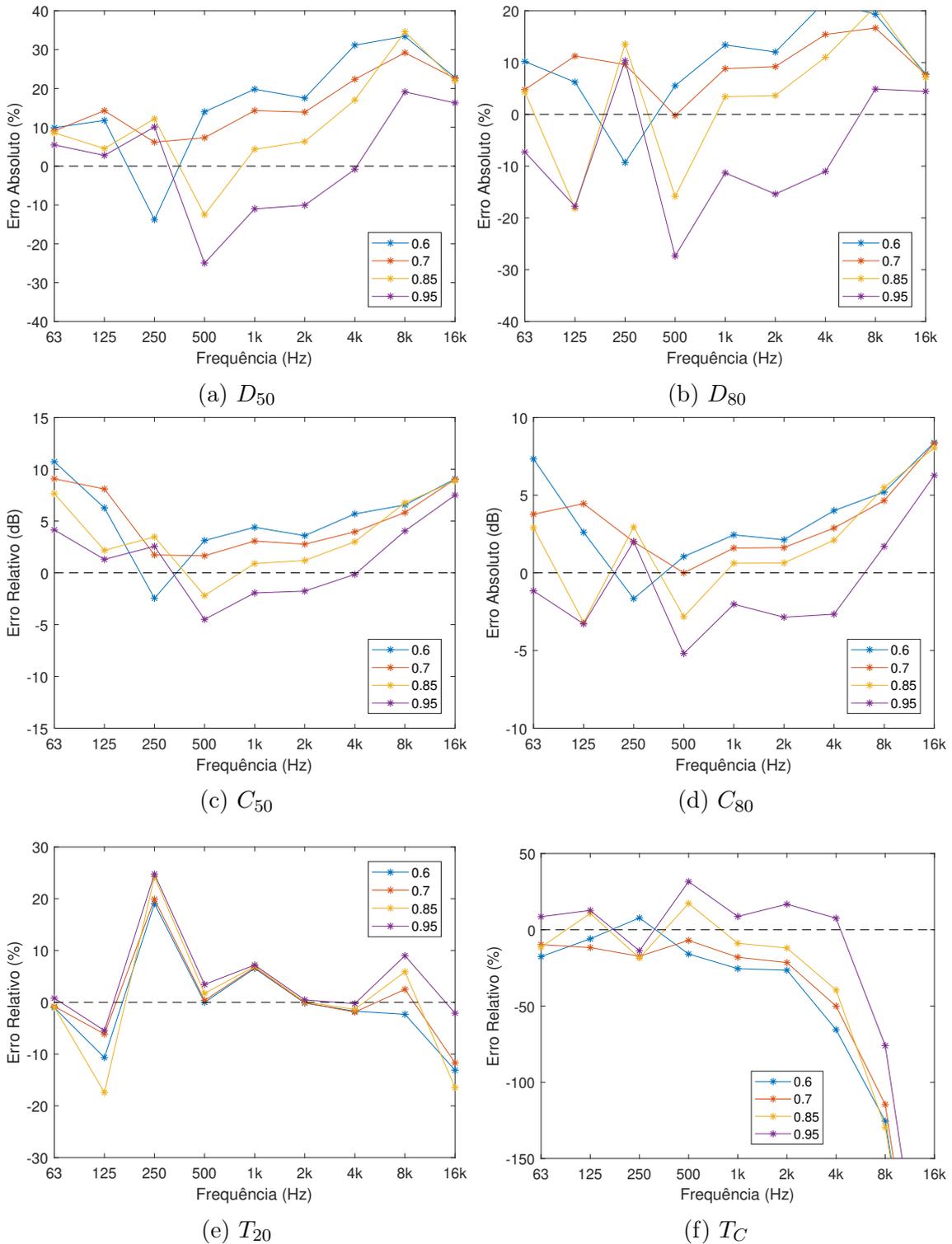


Figura 4.17: Erros dos parâmetros acústicos para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, com ordem máxima de reflexão igual a 10.

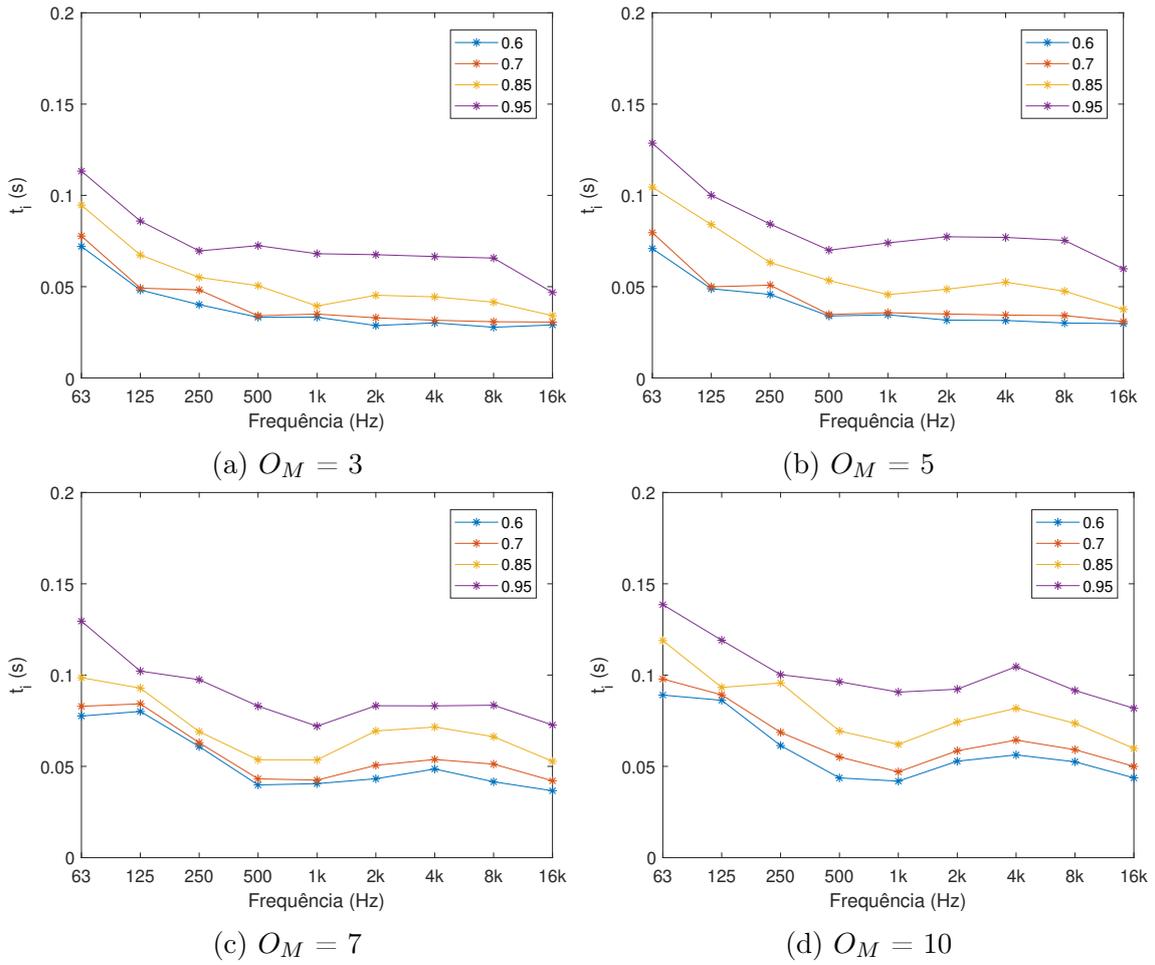


Figura 4.18: Instante inicial da cauda reverberante para o caso sem absorção da sala da Fig. 3.1, para diferentes ordens máximas de reflexões (O_M) e limiares energéticos (curvas em diferentes cores).

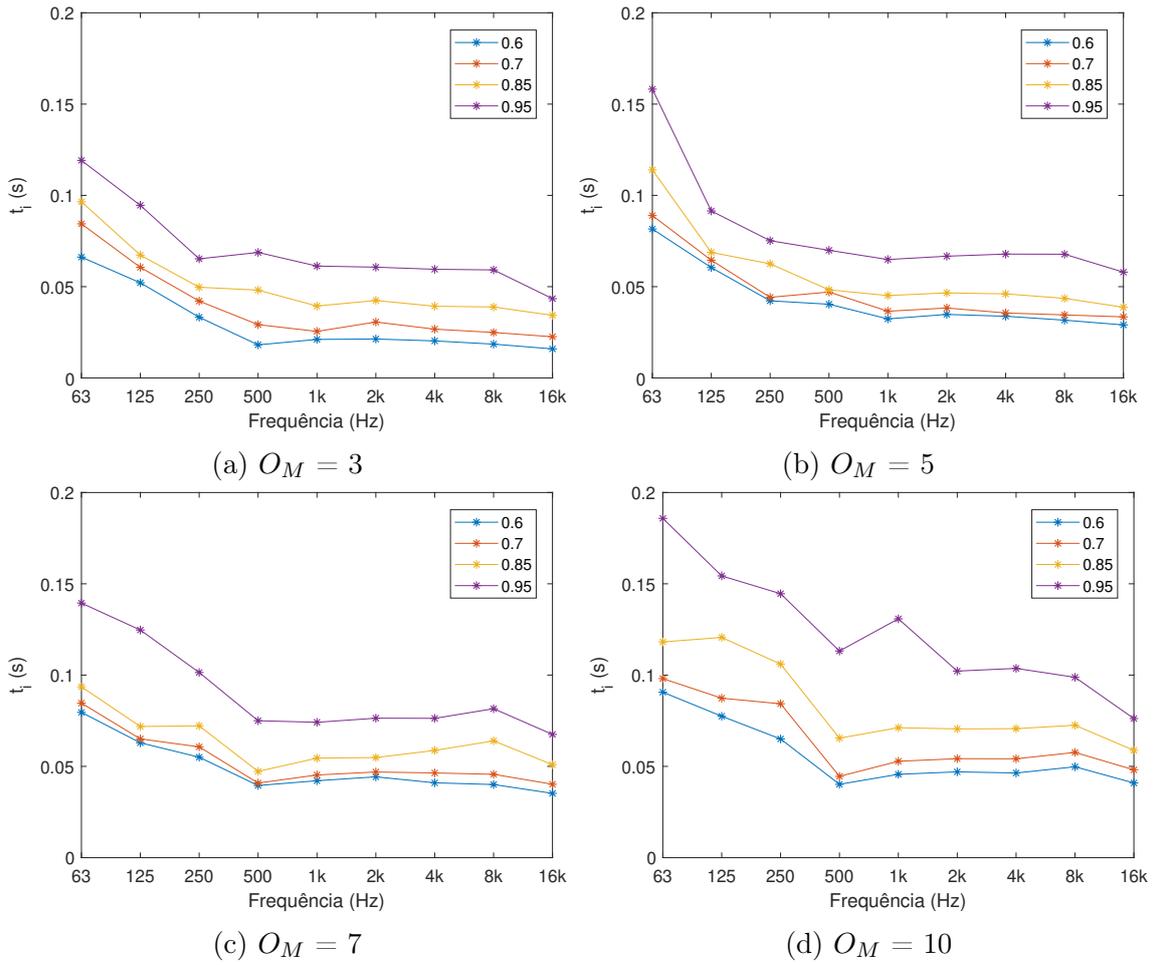


Figura 4.19: Instante inicial da cauda reverberante para o caso com absorção da sala da Fig. 3.1, para diferentes ordens máximas de reflexões (O_M) e limiares energéticos (curvas em diferentes cores).

4.4 Discussão dos Resultados

Os resultados das simulações apresentados neste capítulo mostram que empregar ordens de reflexão mais elevadas no cálculo da IR pelo método de traçado de raios não reduz os erros dos parâmetros acústicos. Na maioria dos casos pioram. Da mesma forma observou-se que não vale a pena utilizar uma percentagem muito alta das amostras da IR obtida da simulação com traçado de raios ($E_L > 90\%$), nem muito pequena ($E_L < 60\%$).

De uma maneira geral, os melhores resultados, tanto para o caso com absorção quanto para o sem absorção, foram obtidos quando o traçado de raios emprega poucas reflexões, por exemplo, 3. Associado à esse parâmetro, o melhor instante para mesclar a cauda reverberante ao traçado de raios ocorreu quando a parcela inicial da IR apresentou 85% da energia total. Os resultados sugerem que a cauda reverberante, sintetizada com ruído Velvet, fornece melhores resultados em ambientes altamente reverberantes.

Os parâmetros acústicos estimados ficaram relativamente próximos dos calculados, com exceção do Tempo Central na faixa de 16 kHz, que apresentou erros muito elevados quando comparados aos outros valores. Nesta faixa, o erro relativo é bastante sensível aos erros de estimativa, uma vez que o tempo central é muito pequeno, aproximadamente 1 ms, como indicado na Fig. 4.8.

Capítulo 5

Validação do Método Proposto

A partir das simulações descritas no Capítulo 4, foram determinados os parâmetros que resultaram no melhor desempenho do método de geração da cauda reverberante proposto nesse trabalho, a saber: ordem de reflexões $O_M = 3$ e limiar de energia $E_L = 0,85$. Com o objetivo de validar o método proposto, são apresentados nesse capítulo resultados de simulações para duas novas salas. Será verificado se os parâmetros de simulação selecionados para a sala da Fig. 3.1 resultam em aproximações das IRs das novas salas com erros dos parâmetros acústicos semelhantes.

As salas analisadas nos testes de validação foram: a Sala de Ensaio da Escola de Música da UFRJ e o Teatro Armando Gonzaga, cujas plantas baixas encontram-se nas Figs. 5.1 e 5.2, respectivamente. As medições das IRs dessas salas foram realizadas para outra pesquisa de mestrado [40], ainda não publicada. As medições foram obtidas a partir de um par fonte-microfone.

O processo de síntese das caudas reverberantes de cada sala é descrito no Capítulo 3. O decaimento energético de cada sub-banda foi calculado tomando a média dos decaimentos de cada uma das medições disponíveis. O início da cauda, bem como a ordem máxima de reflexões usados na simulação foram obtidos pela metodologia descrita no Capítulo 4.

As IRs medidas, usadas como referência para cada uma das duas salas, estão mostradas na Fig. 5.3.

Os parâmetros acústicos medidos para a Sala de Ensaio estão mostrados nas Figs. 5.4 e 5.5, enquanto que nas Figs. 5.6 e 5.7 encontram-se os parâmetros acústicos medidos para o Teatro. Essas duas salas possuem tempos de reverberação relativamente baixos. Em um primeiro momento, é esperado que os resultados das simulações se aproximem dos resultados observados na sala com absorção do Capítulo 4, devido à semelhança dos tempos de reverberação das salas.

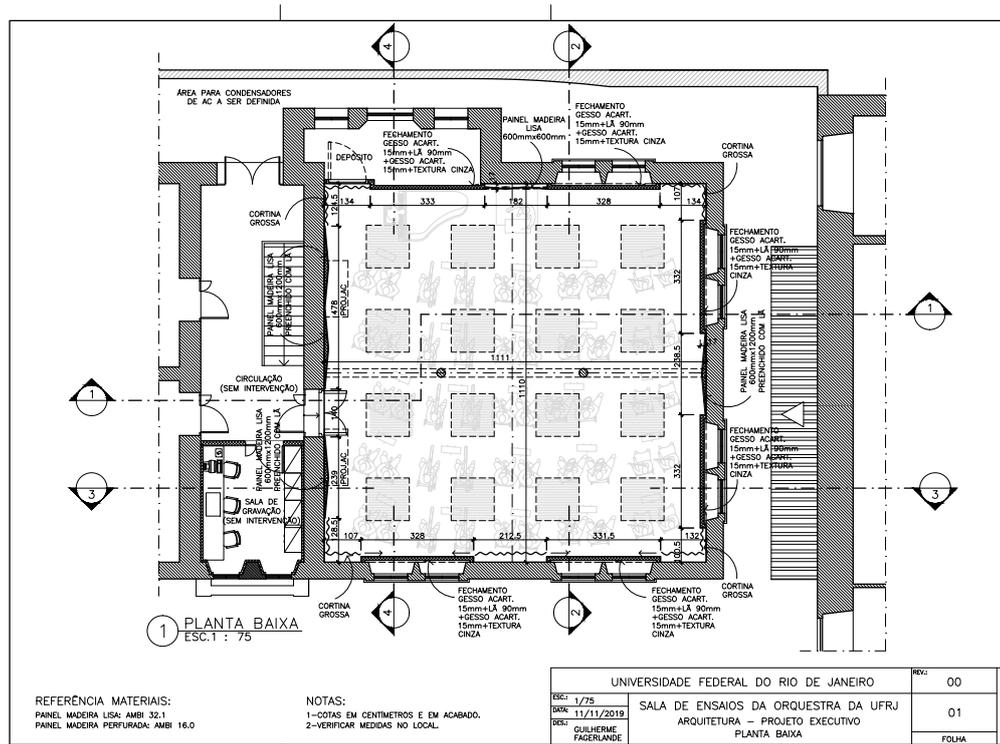


Figura 5.1: Planta baixa da Sala de Ensaio da Escola de Música da UFRJ.

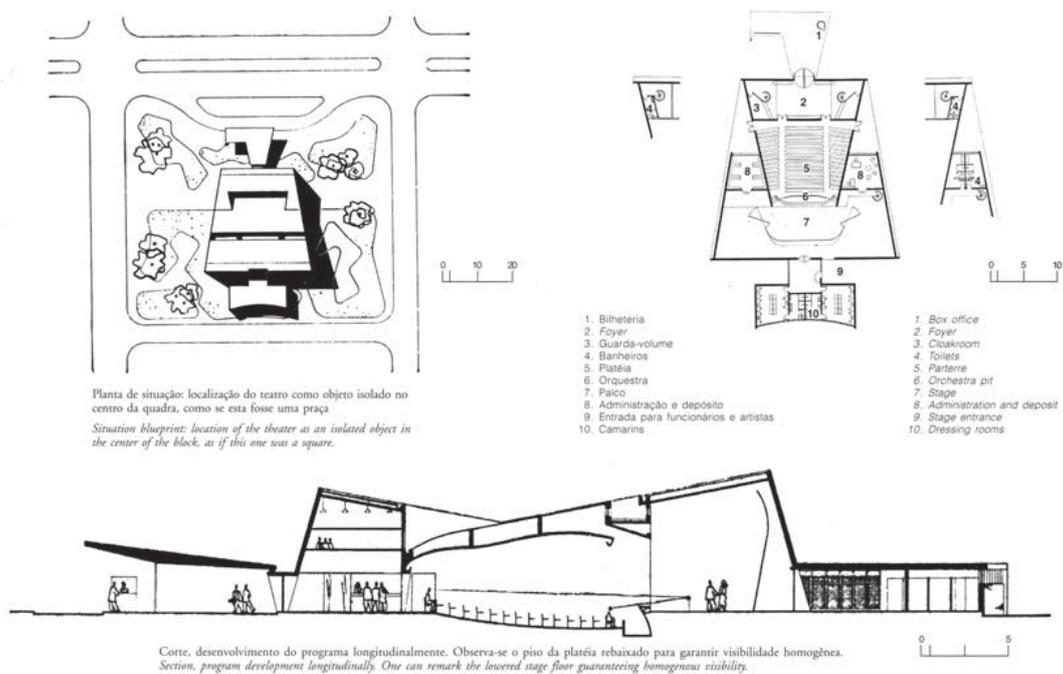
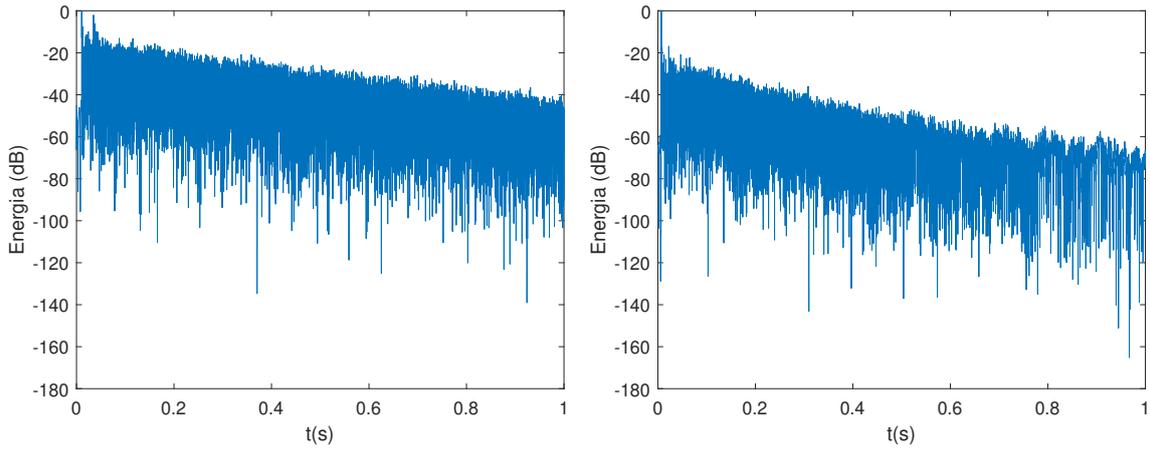


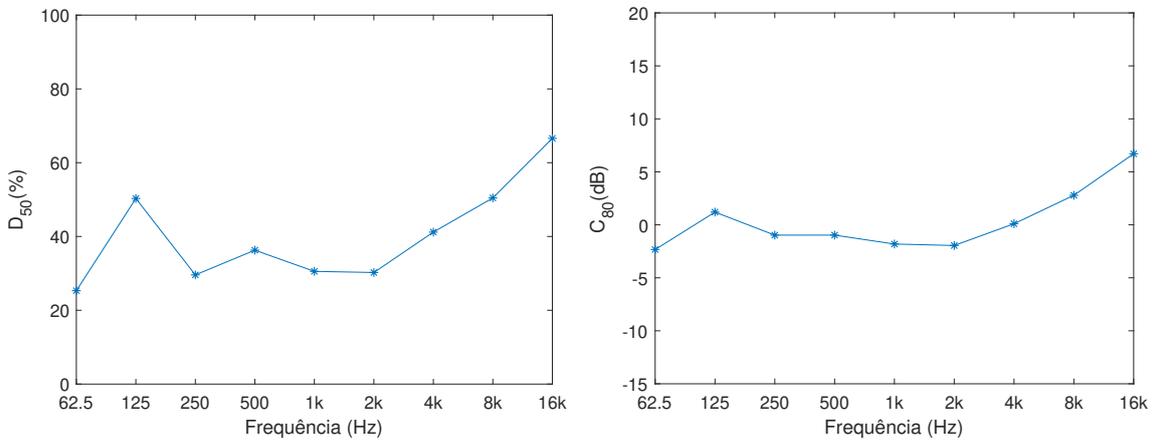
Figura 5.2: Planta baixa do Teatro Armando Gonzaga.



(a) Sala da Escola de Música da UFRJ.

(b) Teatro Armando Gonzaga.

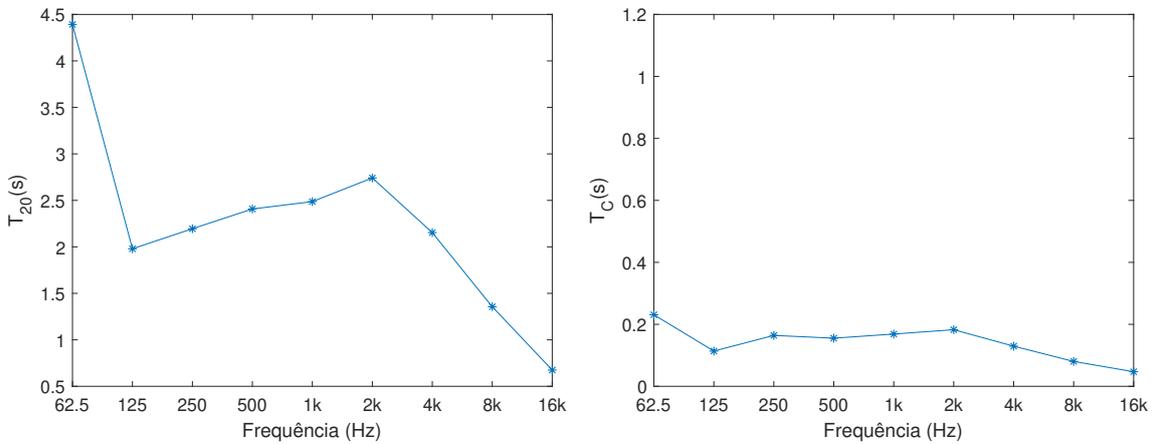
Figura 5.3: IRs medidas das duas salas estudadas neste capítulo.



(a) D_{50}

(b) C_{80}

Figura 5.4: Medições da Clareza e da Definição para a Sala de Ensaio da Escola de Música da UFRJ da Fig. 5.1.



(a) T_{20}

(b) T_C

Figura 5.5: Medições do tempo de reverberação e do tempo central para a Sala de Ensaio da Escola de Música da UFRJ da Fig. 5.1.

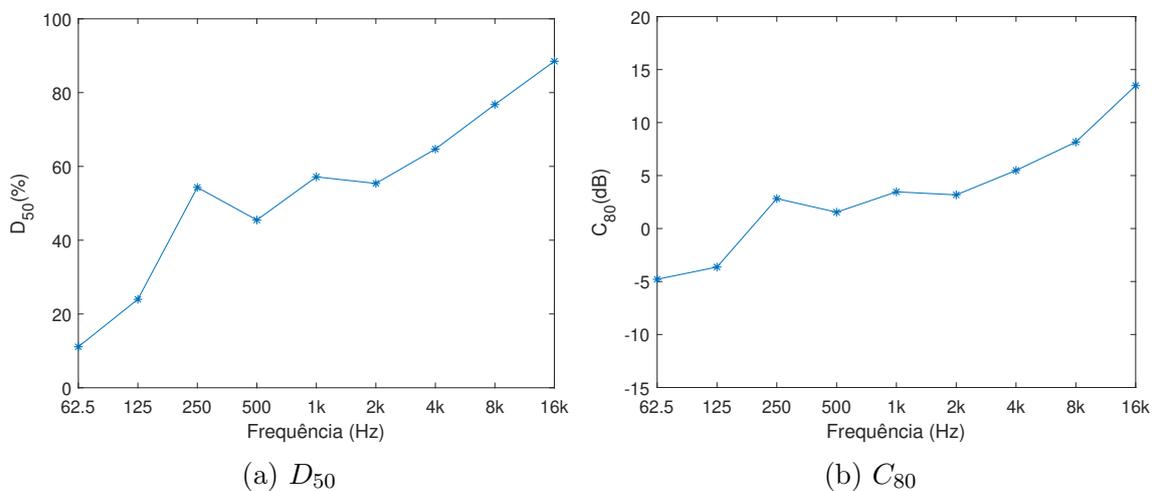


Figura 5.6: Medições da Clareza e da Definição para o Teatro da Fig. 5.2.

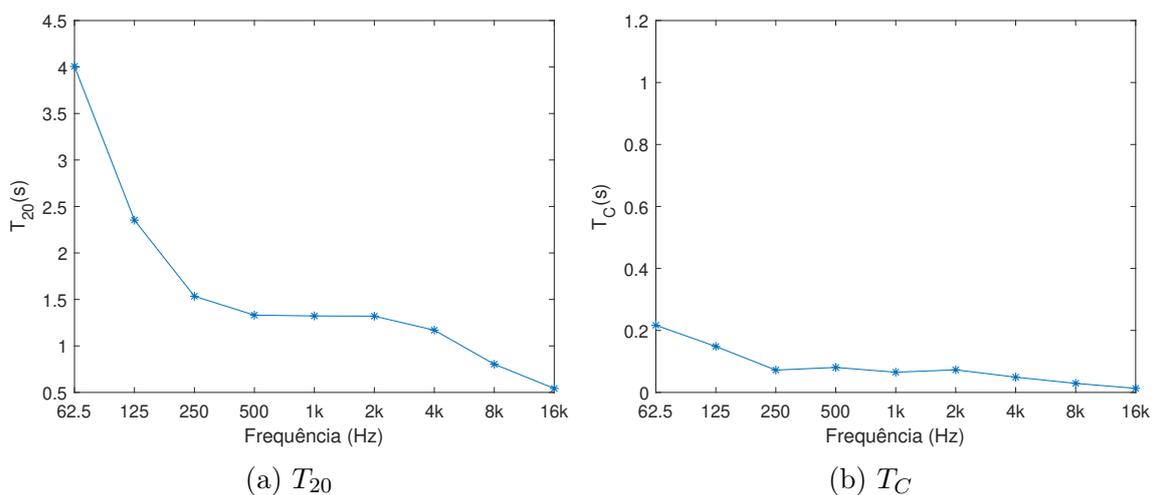


Figura 5.7: Medições do tempo de reverberação e do tempo central para o Teatro da Fig. 5.2.

5.1 Resultados das Simulações

Todas as simulações foram feitas com os mesmos parâmetros de ordem máxima de reflexão ($O_M = 3$) e limiar de energia determinante do início da cauda ($E_L = 0,85$). Os resultados das simulações para a Sala da Escola de Música estão mostrados na Fig. 5.8, enquanto que os resultados das simulações do Teatro estão indicados na Fig. 5.10. O início da cauda reverberante para a sala de ensaio e para o teatro estão nas Figs. 5.9 e 5.11, respectivamente.

Para representar os erros obtidos nas estimativas da clareza e definição foi utilizado um gráfico do tipo *box plot* [41]. Neste tipo de gráfico é possível observar o efeito das diferentes realizações da cauda reverberante (da IR simulada) na dispersão do erro.

As medidas de erro empregadas para avaliar as simulações estão definidas nas Eqs. (4.5) e (4.6). Ou seja, para a clareza e a definição, foi utilizado o erro absoluto enquanto que para o tempo de reverberação e o tempo central, foi utilizado o erro relativo.

Para as duas salas foi avaliado o erro médio nos parâmetros acústicos para 30 realizações da cauda reverberante sintetizada, como descrito no Capítulo 4. Neste Capítulo foram considerados os seguintes parâmetros acústicos na análise: D_{50} , C_{80} , T_{20} e T_C . Os parâmetros D_{80} e C_{50} foram desconsiderados por apresentarem resultados muito semelhantes aos observados para o D_{80} e C_{50} , respectivamente.

5.2 Discussão

Comparando os resultados do Capítulo 4 com os resultados deste capítulo, para os mesmo critérios de simulação os menores erros foram observados para a sala indicada na Fig. 3.1 – câmara reverberante da Universidade RWTH em Aachen, Alemanha – sem o material fono-absorvente em uma de suas paredes. A sala de ensaio e o teatro, por sua vez, apresentaram erros semelhantes aos obtidos para a sala da Fig. 3.1 com absorção sonora, sugerindo que o desempenho do método proposto é consistente com as características acústicas da sala. Em outras palavras, as simulações indicam que salas com características semelhantes de reverberação apresentam resultados semelhantes, ou seja, com a mesma ordem de grandeza. A sala de ensaio, em particular, apresentou os piores resultados para a clareza e definição nas faixas de 63 Hz a 125 Hz. Esses valores podem ser explicados pelo ajuste da curva de decaimento energético não ter sido apropriado, ou pela limitação do traçado de raios que, dependendo do volume da sala, falha em aproximar as baixas frequências, pois não considera os fenômenos ondulatórios na simulação. Tanto para a sala de ensaio quanto para o teatro, a clareza e a definição apresentaram maior variabilidade, entre

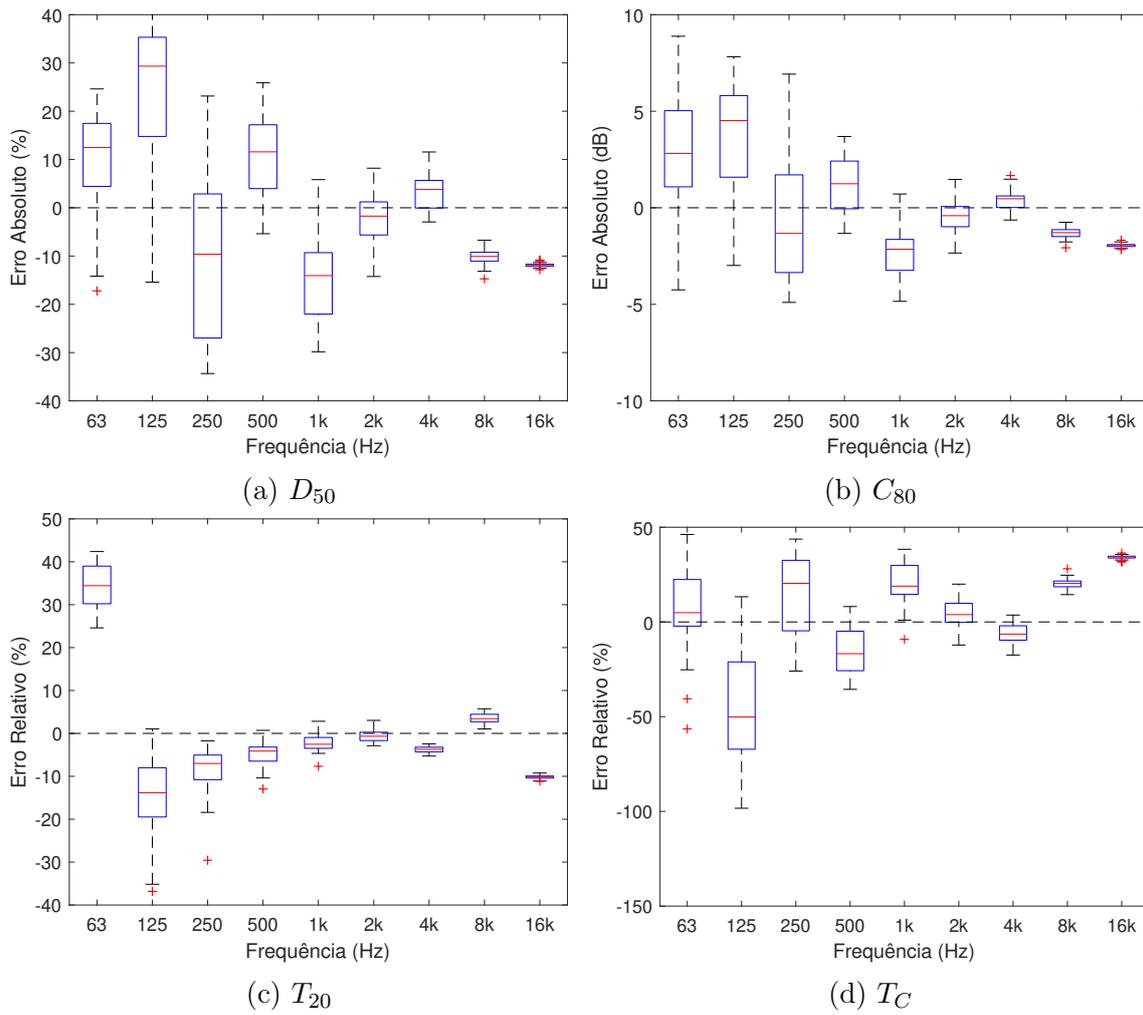


Figura 5.8: Erros observados nas simulações da Sala de Ensaio com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$

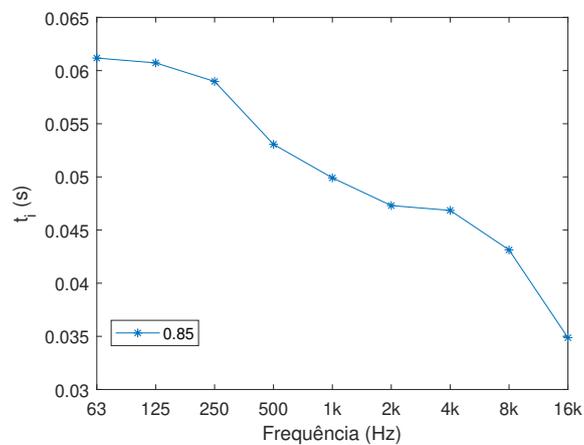


Figura 5.9: Início da cauda reverberante para a Sala de Ensaio com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$

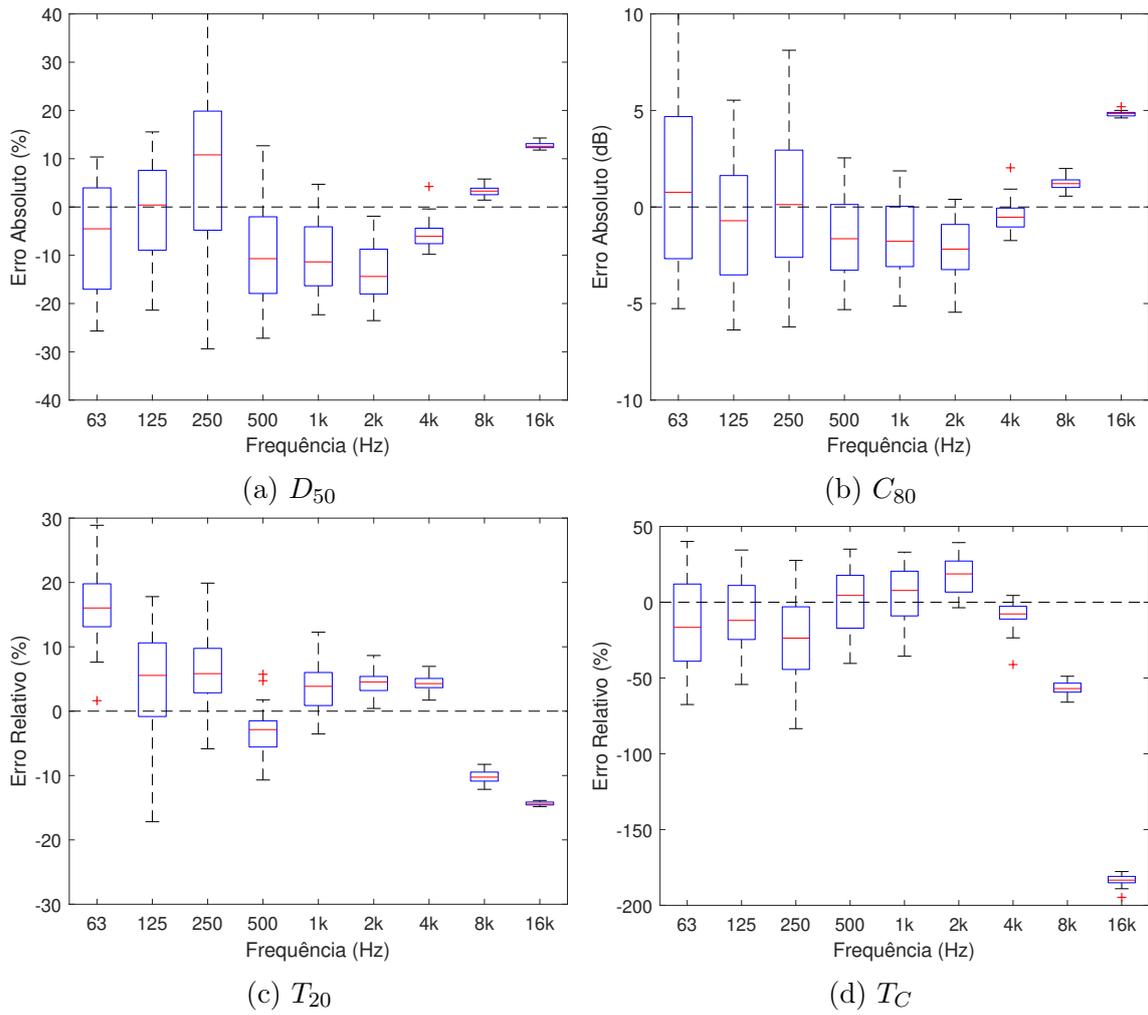


Figura 5.10: Erros observados nas simulações do Teatro com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$

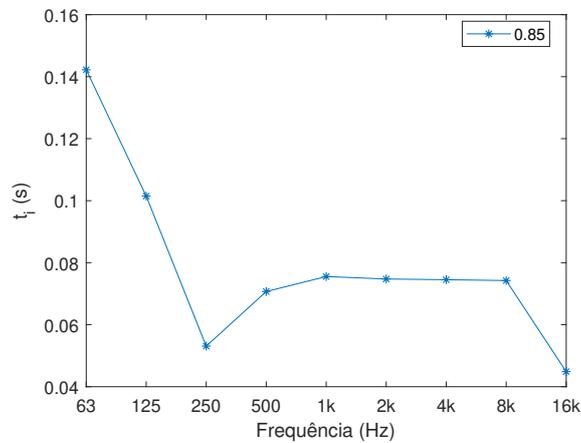


Figura 5.11: Início da cauda reverberante para o Teatro com $O_M = 3$ e $E_L = 0,85$

diferentes realizações da IR, nas baixas frequências – entre 63 e 250 Hz. Entre as médias e altas frequências a sensibilidade desses parâmetros às diferentes realizações da cauda foi consideravelmente menor. Usualmente, a cauda reverberante tem seu início entre 50ms e 80ms após o início da IR [5]. Considerando este fenômeno, é observado que o início da cauda reverberante (e fim do traçado de raios) para a sala de ensaio – indicado na Fig. 5.9 – está dentro do esperado. Em contrapartida, para o teatro, o início da cauda reverberante é consideravelmente mais alto do que o esperado – como indicado na Fig. 5.11 – sugerindo que, nesse caso, um valor mais baixo para o parâmetro $E_L < 0,85$ fosse considerado na simulação.

Ao observar o início da cauda em cada faixa de frequência para a sala de ensaio e para o teatro – Figs. 5.9 e 5.11, respectivamente

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho avaliamos um método para reduzir o custo computacional da simulação de respostas ao impulso de salas pelo traçado de raios, que, apesar de simples e em geral apresentar resultados satisfatórios, demanda elevado tempo de processamento para obter estimativas confiáveis para a cauda reverberante, o que pode invalidar sua aplicação. O método proposto consistiu em dividir a IR de uma sala em duas partes e estimar cada uma delas de maneira diferente.

A primeira parte é obtida pelo traçado de raios, e contém apenas o som direto e as reflexões iniciais. Nesta etapa, as estimativas obtidas pelo traçado de raios são confiáveis e demandam pouco tempo de simulação. A segunda parte é calculada a partir de um modelo estatístico especificamente desenvolvido para simular a cauda reverberante da IR. No método proposto o tempo de simulação do traçado de raios é consideravelmente menor uma vez que a parte computacionalmente mais custosa deste processo (simulação da cauda reverberante) é sintetizada de outra maneira.

Para sintetizar a cauda reverberante, é necessário definir a distribuição estatística empregada para gerar o ruído utilizado e o decaimento energético característico da sala. O cálculo do decaimento energético teórico, por ser um procedimento complexo, não foi abordado neste trabalho, sendo a curva do decaimento estimada a partir da RIR medida. Para escolher o ruído com característica apropriada, avaliamos o ajuste da cauda sintetizada para as distribuições mais usuais com relação ao tempo de reverberação medido. A partir dos resultados do Capítulo 3, o ruído Velvet com concentração de 4.000 picos por segundo foi escolhido como referência.

A partir desse modelo, no Capítulo 4 foi avaliado o efeito da concatenação da cauda sintetizada na IR gerada pelo traçado de raios. Na falta de um critério bem definido para determinar o instante de tempo em que o traçado de raios não mais fornece resultados confiáveis, foram feitas diferentes simulações considerando diferentes instantes para início da cauda reverberante sintetizada. Além disso, foi observado o efeito da ordem de reflexão máxima considerada na simulação do traçado de raios. A partir desses resultados, foram definidos a ordem máxima e o tempo

inicial padrão para a cauda que, em teoria, deveriam ser apropriados para outras salas com características semelhantes.

Para verificar se os critérios definidos no Capítulo 4 eram satisfatórios, outras duas salas foram simuladas utilizando os mesmos critérios. Os resultados, de uma maneira geral, foram consistentes com os resultados do Capítulo 4, mostrando que o método proposto pode ser aplicado em diferentes cenários.

6.1 Trabalhos Futuros

No procedimento desenvolvido para a síntese da cauda reverberante, o decaimento energético foi obtido das medições de IRs disponíveis, por falta de um método de estimativa confiável. Encontrar a curva de decaimento energético, bem como avaliar possíveis aproximações, sem o auxílio das medições da sala seria uma contribuição importante para este trabalho.

Outro critério que não foi considerado na síntese da cauda, mas que existe na propagação sonora, diz respeito ao número de reflexões de um raio que atingem um determinado receptor. É sabido que as reflexões tendem a aumentar com o tempo decorrido. Assim, avaliar o efeito da concentração das amostras do ruído (λ) em função do tempo contribuiria para que a síntese da cauda reverberante estivesse mais próxima do fenômeno físico considerado.

Referências Bibliográficas

- [1] SCHRÖDER, D. *Physically Based Real-Time Auralization of Interactive Virtual Environments*. Tese de D.Sc., RWTH Aachen, Aachen, Alemanha, 2011.
- [2] KROKSTAD, A., STROM, S., SØRSDAL, S. “Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique”, *Journal of Sound and Vibration*, v. 8, n. 1, pp. 118 – 125, 1968.
- [3] TORRES, J. C. B. “BRASS - Brazilian Room Acoustic Simulation”. In: *XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, Porto Alegre, out. 2018.
- [4] VALIMAKI, V., PARKER, J. D., SAVIOJA, L., et al. “Fifty Years of Artificial Reverberation”, *Trans. Audio, Speech and Lang. Proc.*, v. 20, n. 5, pp. 1421–1448, jul. 2012.
- [5] KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. 6 ed. Florida, CRC Press, 2017.
- [6] SAVIOJA, L., SVENSSON, U. P. “Overview of geometrical room acoustic modeling techniques”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 138, n. 2, pp. 708–730, 2015.
- [7] GARDNER, W. “Reverberation Algorithms”. In: Kahrs, M., Brandenburg, K. (Eds.), *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*, 1 ed., Srpinger-Verlang, cap. 3, Boston, Ma, 2002.
- [8] MARTIN, J., VAN MAERCKE, D., VIAN, J. “Binaural simulation of concert halls: A new approach for the binaural reverberation process”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 94, n. 6, pp. 3255–3264, 1993. doi: 10.1121/1.407232.
- [9] XIANG, N., TRIVEDI, U., XIE, B. “Artificial enveloping reverberation for binaural auralization using reciprocal maximum-length sequences”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 145, n. 4, pp. 2691–2702, abr. 2019.

- [10] VÖRLANDER, M. *Auralization Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. 1 ed. New York, Springer-Verlang, 2008.
- [11] MAA, D. Y. “Flutter Echoes”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 13, n. 2, pp. 170–178, fev. 1941.
- [12] ALLRED, J. C., NEWHOUSE, A. “Applications of the Monte Carlo Method to Architectural Acoustics”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 30, n. 1, pp. 1–3, 1958.
- [13] SABINE, W. C., EGAN, M. D. “Collected Papers on Acoustics”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 95, n. 6, pp. 3679–3680, 1994.
- [14] FIGUEIREDO, F. L. *Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música*. Tese de D.Sc., ECA/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2005.
- [15] MEYER, E. “Definition and Diffusion in Rooms”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 26, n. 5, pp. 630–636, 1954.
- [16] BERANEK, L. L. *Music, Acoustics and Architecture*. 1 ed. New York/London, John Wiley & Sons, 1962.
- [17] SCHROEDER, M. R. “New Method of Measuring Reverberation Time”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 37, n. 3, pp. 409–412, 1965.
- [18] ISO CENTRAL SECRETARY. *Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces*. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, jun. 2009.
- [19] ISO CENTRAL SECRETARY. *Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, jun. 2008.
- [20] MITRA, S. K. *Digital Signal Processing*. 6 ed. USA, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2005. ISBN: 0073048372.
- [21] OPPENHEIM, A. V., SCHAFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. 3rd ed. USA, Prentice Hall Press, 2009. ISBN: 0131988425.
- [22] PAPOULIS, A., PILLAI, S. U. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Fourth ed. Boston, McGraw Hill, 2002. ISBN: 0071122567 9780071122566 0073660116 9780073660110 0071226613 9780071226615.

- [23] PEEBLES, P. Z. *Probability, random variables, and random signal principles*. 2nd ed ed. New York, McGraw-Hill, 1987.
- [24] KARJALAINEN, M., JÄRVELÄINEN, H. “Reverberation modeling using velvet noise”, *Proceedings of the AES International Conference*, 01 2007.
- [25] HAYKIN, S. *Digital Communications*. USA, John Wiley & Sons, Inc., 1988. ISBN: 0471629472.
- [26] PROAKIS. *Digital Communications 5th Edition*. Fifth ed. , McGraw Hill, 2007.
- [27] PRESS, W. H. “Flicker noises in astronomy and elsewhere.” *Comments on Astrophysics*, v. 7, n. 4, pp. 103–119, jan. 1978.
- [28] GRUBER, P. “1/f - Noise Generator”. In: D’AMICO, A., MAZZETTI, P. (Eds.), *Noise in Physical Systems and 1/f Noise 1985*, Elsevier, pp. 357 – 360, Amsterdam, 1986. ISBN: 978-0-444-86992-0.
- [29] SZENDRO, P., VINCZE, G., SZASZ, A. “Pink-noise behaviour of biosystems”, *European biophysics journal : EBJ*, v. 30, pp. 227–31, 08 2001.
- [30] KASDIN, N. J. “Discrete simulation of colored noise and stochastic processes and 1/f/sup /spl alpha// power law noise generation”, *Proceedings of the IEEE*, v. 83, n. 5, pp. 802–827, May 1995.
- [31] VÄLIMÄKI, V., LEHTONEN, H.-M., TAKANEN, M. “A Perceptual Study on Velvet Noise and Its Variants at Different Pulse Densities”, *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, v. 21, pp. 1481–1488, 07 2013.
- [32] TORRES, J. C., ASPÖCK, L., VORLAENDER, M. “Comparative study of two geometrical acoustic simulation models”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, 06 2018. doi: 10.1007/s40430-018-1226-1.
- [33] ISO CENTRAL SECRETARY. *American National Standard Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters*. Standard, Acoustical Society of America, Melville, NY, 2009.
- [34] BOMHARDT, R., BERZBORN, M., KLEIN, J., et al. “The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing”. In: *Proceeding of German Acoustic Society (DAGA)*, Kiel, 03 2017.

- [35] GILL, P. E., MURRAY, W., WRIGHT, M. H. *Practical optimization*. London, Academic Press Inc. [Harcourt Brace Jovanovich Publishers], 1981. ISBN: 0-12-283950-1.
- [36] VENTURI, A., FARINA, A. “On the effects of pre-processing of impulse responses in the evaluation of acoustic parameters on room acoustics”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 133, pp. 3224, 05 2013. doi: 10.1121/1.4805120.
- [37] LUNDEBY, A., BIETZ, H., VIGRAN, T. E., et al. “Uncertainties of Measurements in Room Acoustics”, *Acustica*, v. 81, pp. 344–355, 1995.
- [38] GUSKI, M., VORLÄNDER, M. “Measurement Uncertainties of Reverberation Time caused by Noise”, *Proceedings of the International Conference on Acoustics*, pp. 2067–2070, mar 2013.
- [39] KRUEGER, D., JEONG, C.-H., BRUNSKOG, J., et al. “Audible reflection density for different late reflection criteria in rooms”. v. 7, 08 2012.
- [40] FAGERLANDE, G. C. *PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E ADEQUAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS DE ESPETÁCULO DE MÚLTIPLO USO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [41] VELLEMAN, P. F., HOAGLIN, D. C. *Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis*. Pacific Grove, CA, Duxbury Press, 1981. ISBN: 0-12-283950-1.