

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Comparação entre medição e simulação utilizando distintos programas de acústica de salas

Oliveira, S.¹; Brandão, E.^{1,2}; Melo, V. S. G.^{1,2}; Tenenbaum, R.¹; Mareze, P.²

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
sofia.oliveira@acad.ufsm.br, ratenenbaum@gmail.com

² Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
{eric.brandao, viviane.melo, paulo.mareze}@eac.ufsm.br

Resumo

O objetivo deste artigo é analisar o desempenho obtido por três programas distintos de simulação acústica de salas, dois deles desenvolvidos no meio acadêmico (um deles no Brasil) e um em âmbito comercial. Os algoritmos em questão baseiam-se em acústica geométrica, mas com diferentes implementações. A sala simulada foi adotada na última intercomparação internacional de simulação acústica e auralização (Round Robin), e os dados geométricos e acústicos cuidadosamente medidos são fornecidos pelos organizadores do certame. Foram analisados quatro parâmetros acústicos (T_{30} , EDT, C_{80} e D_{50}), para dez pares fonte-receptor em bandas de oitava de 125 Hz a 8 kHz. Os erros médios relativos à diferença perceptível são também calculados. As principais conclusões são que existem desvios em relação aos resultados medidos para todos os *software*, com alguns parâmetros sendo melhor avaliados do que outros pelos distintos programas. Percepções preliminares sobre as vantagens e limitações de cada algoritmo são apresentadas, assim como uma análise das respostas impulsivas quadráticas que evidenciam a distribuição do decaimento da energia na sala fornecida por cada simulador.

Palavras-chave: Simulação acústica de salas, Comparação de desempenho de *software*, Acústica geométrica.

PACS: 43.55.Ka, 43.55.Mc, 43.55.Br.

Comparison between measurement and simulation of distinct room acoustics algorithms

Abstract

The objective of this research is to analyze the performance of three distinct room acoustics simulation software, two of them developed in the academic realm (one from Brazil) and one commercial software. The algorithms at hand are based in geometrics acoustics, but with different implementation. The simulated room was adopted at the last international inter-comparison on room acoustical simulation and auralization (Round Robin), the carefully measured geometric and acoustic data was supplied by the organization body. Four acoustic parameters were analyzed (T_{30} , EDT, C_{80} and D_{50}), for ten source-receiver pairs in octave bands from 125 Hz to 8 KHz. The relative mean errors, to the just noticeable difference, are also computed. The main findings are that there are deviations, relative to the measured results, in all software with some of the parameters better evaluated than others. Preliminary insights about the advantages and limitations of each algorithm are presented, as well as an analysis of the quadratic impulse responses that show the distribution of energy decay in the room provided by each simulator.

Keywords: Room acoustics simulation, Software performance comparison, Geometrical acoustics.



1. INTRODUÇÃO

A simulação acústica de salas acompanha o processo projetual de melhores espaços, sobretudo em casos como cinemas, teatros, salas de concerto e casas de ópera. Assim, a simulação acústica se torna uma etapa importante para a garantia da qualidade sonora de um recinto.

Existem duas abordagens principais que se pode utilizar. A primeira, envolvendo a solução da equação da onda, tem solução fechada conhecida para salas retangulares. Para geometrias mais complexas, o Método dos Elementos Finitos (FEM) [1, 2], o Método dos Elementos de Contorno (BEM) [3, 4] e o Método das Diferenças Finitas (FDTD) [5, 6], podem ser aplicados com um custo computacional elevado. A segunda abordagem é conhecida como acústica geométrica (ou *Geometrical Acoustics* – GA), com custo computacional reduzido nas médias e altas frequências. Os métodos baseados em GA são aplicáveis acima da frequência de Schroeder [7], e levam em consideração que as frentes de onda são discretizadas em raios acústicos, viajando em uma direção ortogonal a elas. As imprecisões em GA tendem a ser maiores abaixo da frequência de Schroeder, o que torna seu uso justificável após este limite.

Os primeiros trabalhos publicados que envolvem simulação acústica de salas, como os de Allred [8] e Schroeder [9, 10], concentram-se na determinação de respostas impulsivas monoauriculares (RIRs¹). Já nas décadas de 1990 [11–18] e 2000 [19–24], *software* com o objetivo de produzir respostas impulsivas binauriculares (BRIRs²) começaram a surgir, todos operando segundo a Acústica Geométrica. A partir de então, inúmeras teses de doutorado dedicaram-se ao tema [25, 26], além de importantes publicações [27].

Diferentes implementações são possíveis para um algoritmo de GA, produzindo resultados distintos ao simular uma mesma sala, com dados de entrada idênticos [28]. Além disso, os dados de entrada (geometria da sala, coeficientes de absorção e espalhamento por banda de oitava de cada superfície, potência e direcionalidade da fonte sonora, e as funções de transferência associadas

a cabeça humana - HRTFs³) possuem influência significativa nos resultados gerados.

Fomentando a discussão quanto à eficiência e confiabilidade em *software* deste gênero, a partir de 1994 foram criadas as intercomparações internacionais entre programas de simulação, intituladas *Round Robin* (RR). A partir da divulgação dos dados referentes a uma ou mais salas, um certo número de equipes desenvolve simulações em seus algoritmos e posteriormente os resultados obtidos são recolhidos e divulgados pelo grupo organizador do RR, assim como os dados de medição das salas. À cada versão lançada, novas análises eram possíveis, seguindo o estado da arte quanto a simulação acústica em salas [29–32]. O quarto e último RR teve início em 2016, no qual foram disponibilizados nove cenários (seis usados para testar fenômenos acústicos isolados, e três considerados como salas reais). Foram exigidos os cálculos tanto de RIRs como de BRIRs, permitindo a análise de aurilizações e de aspectos subjetivos [33, 34].

Neste trabalho, a precisão do cálculo dos parâmetros acústicos objetivos de três diferentes algoritmos baseados em Acústica Geométrica é mensurada. A sala de música de câmara da Konzerthaus, em Berlim, foi tratada como objeto de estudo. Este artigo é baseado no trabalho dos autores publicados na *Applied Acoustics* [35], cuja principal novidade é a avaliação comparativa do desempenho do *software* RAIOS 7, que participou da última versão do RR mencionada, mas não finalizou as simulações a tempo dos resultados serem incluídos na Ref. [33]. Além disso, as respostas impulsivas quadráticas calculadas pelos simuladores foram comparadas com os dados experimentais, permitindo uma observação das diferenças entre os algoritmos.

2. METODOLOGIA

Nesta seção, são descritos os materiais base da pesquisa e a metodologia utilizada. Também são apresentados a sala estudada, os dados experimentais, e uma descrição dos três algoritmos utilizados, com os principais parâmetros acústicos e as configurações empregadas.

A sala utilizada nesta pesquisa é a Sala 10 da

¹Da sigla em inglês *Room Impulse Responses*.

²Da sigla em inglês *Binaural Room Impulse Responses*.

³Da sigla em inglês *Head Related Transfer Functions*.

quarta versão do *Round Robin* [34], que pode ser observada na Figura 1. A representação em planta baixa, com as coordenadas referentes aos pontos de fonte (LS) e recepção (MP) são dados na Figura 2. Para o ensaio experimental, a fonte sonora foi locada em duas posições diferentes no palco. A resposta ao impulso foi medida em cinco posições de microfone, dispostas na área de audiência. Para esta pesquisa, foi considerada a fonte sonora onidirecional, compatível com a ISO 3382–1 [36].

Os dados simulados foram gerados em três programas de simulação acústica de salas. Quatro parâmetros acústicos foram calculados, em bandas de oitava de 125 Hz a 8 kHz, conforme definido pela norma ISO 3382–1 [36]: o tempo de reverberação estimado em T_{30} e o tempo de decaimento inicial (EDT), ambos em segundos, o fator de Clareza (C_{80}), em dB, e a Definição (D_{50}), adimensional. Todos os parâmetros foram extraídos diretamente de cada algoritmo, sem nenhuma intervenção externa.

Os programas de simulação acústica utilizados foram: o Odeon⁴, na versão 11.23 [38, 39], o RAVEN⁵ [40–42], e o RAIOS⁶ [43–45]. Todos os algoritmos aceitam fontes sonoras com direcionalidades arbitrárias, dados de potência sonora por frequência, absorção do ar, e coeficientes de espalhamento e absorção. Todos são algoritmos híbridos, mas com características particulares. Os programas Odeon e RAVEN calculam a resposta impulsiva dividindo-a em uma parte inicial e outra final. O método de fontes virtuais é usado na parte inicial para calcular os caminhos especulares, até uma ordem de transição definida pelo usuário. A parte final é calculada por meio de um tipo especial de traçado de raios [40]. No *software* RAIOS, as reflexões especulares são obtidas por uma técnica aprimorada de traçado de raios e as reflexões difusas são calculadas usando

o método de transição de energia levemente modificado [44].

As principais configurações adotadas no Odeon, foram:

- 20.032 raios (valor dado pelo próprio programa ao selecionar a opção “*precision*”);
- Máxima ordem de reflexão de 2.000 (critério de parada para cada raio);
- Ordem de transição igual a 2 (determina a transição entre o método inicial de imagens virtuais para o traçado de raios);
- Número de reflexões iniciais igual a 2.504 (estabelecido pelo próprio programa);
- Função “*Screen diffraction*” ativada (o *software* busca calcular o som difratado quando a fonte sonora não é visível pelo receptor);
- Comprimento da resposta impulsiva de 3,5 segundos.

As configurações atribuídas ao RAVEN, foram:

- Ordem de transição do método de imagens virtuais igual a 2;
- O número de raios utilizados foram 20.157 (calculado pelo próprio programa em função das características da sala);
- Perda máxima de energia, ou “*Energy Loss*”, de –60 dB;
- Comprimento da resposta impulsiva de 3,5 segundos.

No *software* RAIOS 7, as configurações adotadas foram:

- O número de raios utilizados no método de traçado de raios é de 20.000;
- Número de elementos triangulares de superfície igual a 2.652;
- Decaimento considerado de cada raio de –60 dB;
- Comprimento da resposta impulsiva de 3,5 segundos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção os resultados serão apresentados e discutidos. A primeira análise é feita sob a observação dos parâmetros acústicos vs. frequência e parâmetros acústicos vs. par fonte-receptor, em que é verificado o comportamento de cada um dos programas em uma comparação pontual. A sala simulada possui um tamanho considerado

⁴*Software* desenvolvido originalmente no meio acadêmico e atualmente pela Odeon A/S da Dinamarca.

⁵Sigla para *Room Acoustics for Virtual Environments*. Foi desenvolvido no Institute of Technical Acoustics (ITA), da RWTH Aachen University, na Alemanha.

⁶Sigla para *Room Acoustics Integrated and Optimized Software*. Desenvolvido no ambiente acadêmico brasileiro em uma cooperação de longo prazo envolvendo a Universidade Federal de Santa Maria, a Universidade Federal de Rio de Janeiro e a Universidade do Estado do Rio de Janeiro.



Figura 1: Sala de música de câmara Konzerthaus, em Berlim [33, 34]).

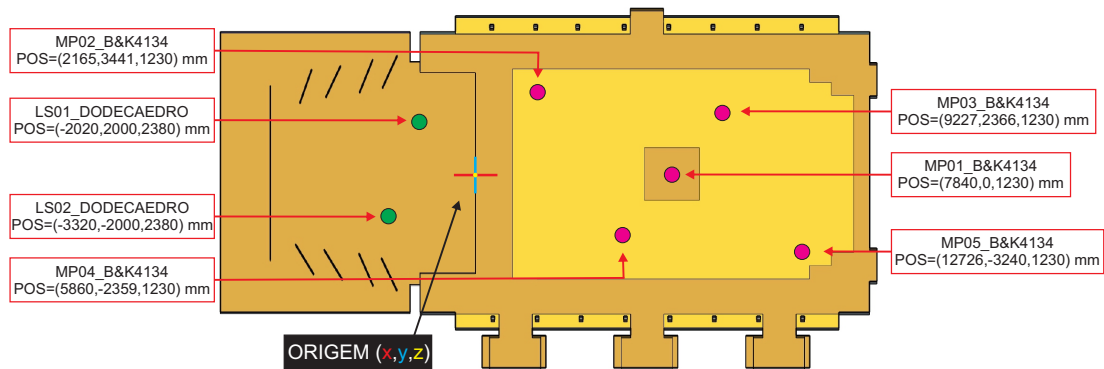


Figura 2: Modelo 3D com as coordenadas dos receptores e fontes sonoras [35, 37]).

médio, com aproximadamente 2.350 m^3 . Os parâmetros calculados (T_{30} , EDT, C_{80} e D_{50}) para os dez pares fonte-receptor, em todas as frequências de banda de oitava geraram um total de 68 gráficos comparativos diferentes. Neste trabalho, por uma questão de brevidade, 16 deles serão apresentados.

Na Seção 3.1 os quatro parâmetros acústicos são plotados em função da frequência. Uma média aritmética simples dos resultados para os dez pares fonte-receptor é apresentada. Na Seção 3.2, os mesmos parâmetros são dados em função dos dez pares fonte-receptor, para as bandas de frequência de 125 Hz, 1 kHz e 8 kHz. Uma análise do erro médio relativo ao *Just Noticeable Difference* (JND)⁷ é apresentada na Seção 3.3, e uma comparação das respostas impulsivas monoauriculares quadráticas é fornecida na Seção 3.4.

3.1 Parâmetros acústicos vs frequência

As médias dos valores obtidos entre os 10 pontos de fonte-receptor, para o T_{30} , EDT, C_{80} e D_{50} estão apresentadas na Figura 3. Em cada gráfico pode-se observar os valores médios calculados para cada um dos parâmetros, assim como o resultado médio medido e o JND, em função da frequência, de 125 Hz a 8 kHz.

A frequência de Schroeder [47–49], f_s , da sala é dada por

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}, \quad (1)$$

em que T_{60} é o tempo de reverberação e V o volume da sala. Considerando o T_{30} medido, indicado na Figura 3, e tomando o maior valor observado de aproximadamente 1,6 s, e o volume da sala de 2.350 m^3 , tem-se um valor aproximado de $f_s = 52 \text{ Hz}$. Portanto, a faixa de análise de 125 Hz a 8 kHz encontra-se acima deste limite. Apesar da densidade modal nas primeiras bandas de oitava não ser idealmente grande para a aplicação

⁷O JND pode ser traduzido como: Diferença no limiar do observável. Ele representa a menor mudança em um dado parâmetro, que é perceptível a um ser humano médio [46].

dos cálculos em acústica geométrica, este limite propõe que pelo menos mais do que 3 modos por Hz estão em análise [50].

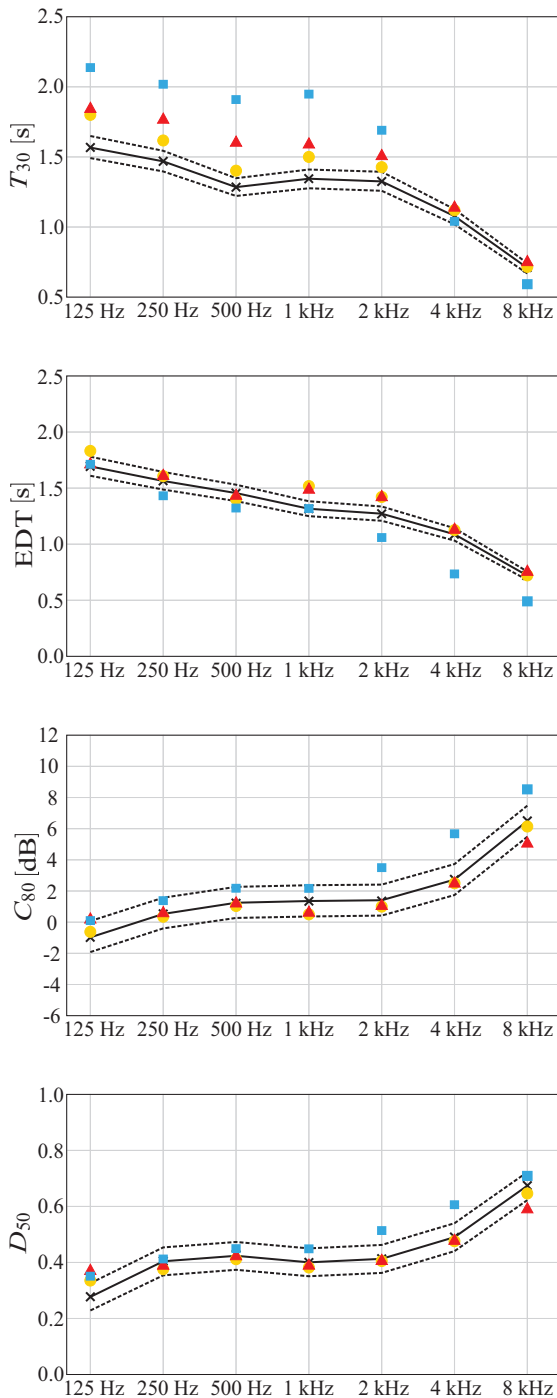


Figura 3: Dados experimentais e simulados, dos parâmetros acústicos em função da frequência (média dos resultados obtidos para os 10 pontos de fonte-recepção). Legenda: Medição (—x—), $\pm$ JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

Ao observar os gráficos na Figura 3, pode-se notar que os dados simulados tendem a ficar fora da faixa estabelecida para o $\pm$ JND – para os parâmetros EDT e T_{30} . Para o T_{30} , os três programas

apresentaram uma tendência de superestimar os valores nas frequências inferiores a 4 kHz. Entre eles, o RAIOS apresentou um maior afastamento dos valores medidos, seguido pelo RAVEN. Com o melhor desempenho dentre os dados analisados, o Odeon ainda apresentou valores acima do limite superior estabelecido pelo JND.

Para o EDT, em 1 kHz e 2 kHz, os programas Odeon e RAVEN tiveram a tendência de superestimar os valores calculados. Já o RAIOS mostra uma tendência a subestimativa dos valores a partir de 2 kHz. A causa disto pode ter ligação com uma certa imprecisão dos algoritmos no registro do decaimento inicial da resposta ao impulso da sala, o que será melhor discutido posteriormente.

Para o C_{80} e D_{50} , na maior parte do espectro, as simulações conseguiram acompanhar a tendência da curva medida. Para o C_{80} , os resultados do RAIOS foram registrados acima do JND para as frequências a partir de 1 kHz, com alguns desvios também observados pelo RAVEN em 125 Hz e 8 kHz. Para o D_{50} , na banda de 125 Hz, os três programas apresentaram um resultado superestimado, assim como em 2 kHz e 4 kHz para o RAIOS. Além disso, em 8 kHz o RAVEN apresentou um valor abaixo do limite inferior proposto pelo JND.

3.2 Parâmetros acústicos vs. par fonte-receptor

As Figuras 4, 5 e 6 mostram os parâmetros acústicos em função de todos os pares fonte-receptor, nas bandas de frequência de 125 Hz, 1 kHz e 8 kHz respectivamente. Os resultados medidos e o JND são apresentados conforme indicado na Seção 3.1.

Para o T_{30} , os valores simulados aparecem nitidamente superestimados, acima do limite superior do JND, para as frequências de 125 Hz e 1 kHz (Figuras 4 e 5), com o Odeon apresentando menores desvios entre os programas. Uma menor dispersão nas altas frequências é percebida (Figura 6) em que apenas o RAIOS subestimou os valores. O EDT apresentou resultados mais acertados, apesar de registrar oscilações observáveis nas baixas frequências (Figura 4). Também se pode notar que os *software* não conseguem reproduzir as variações espaciais registradas em medição para os parâmetros C_{80} e D_{50} .

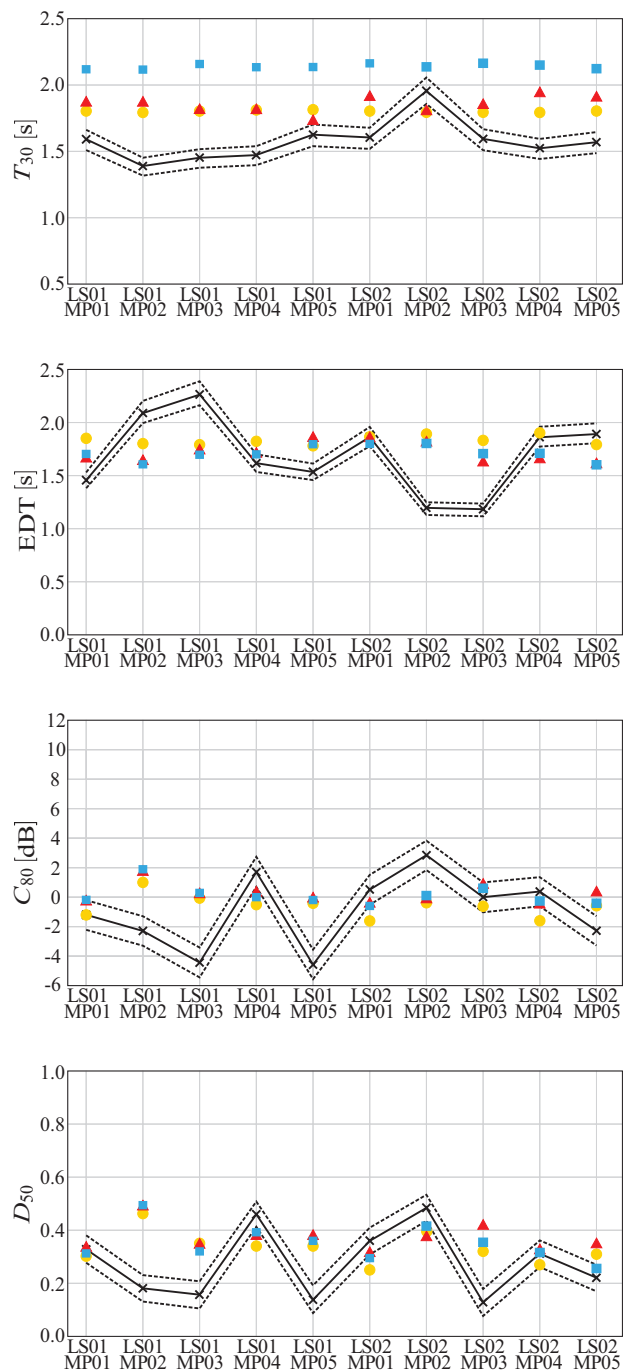


Figura 4: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 125 Hz.

Legenda: Medição (—x—), $\pm$ JND (---),
Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

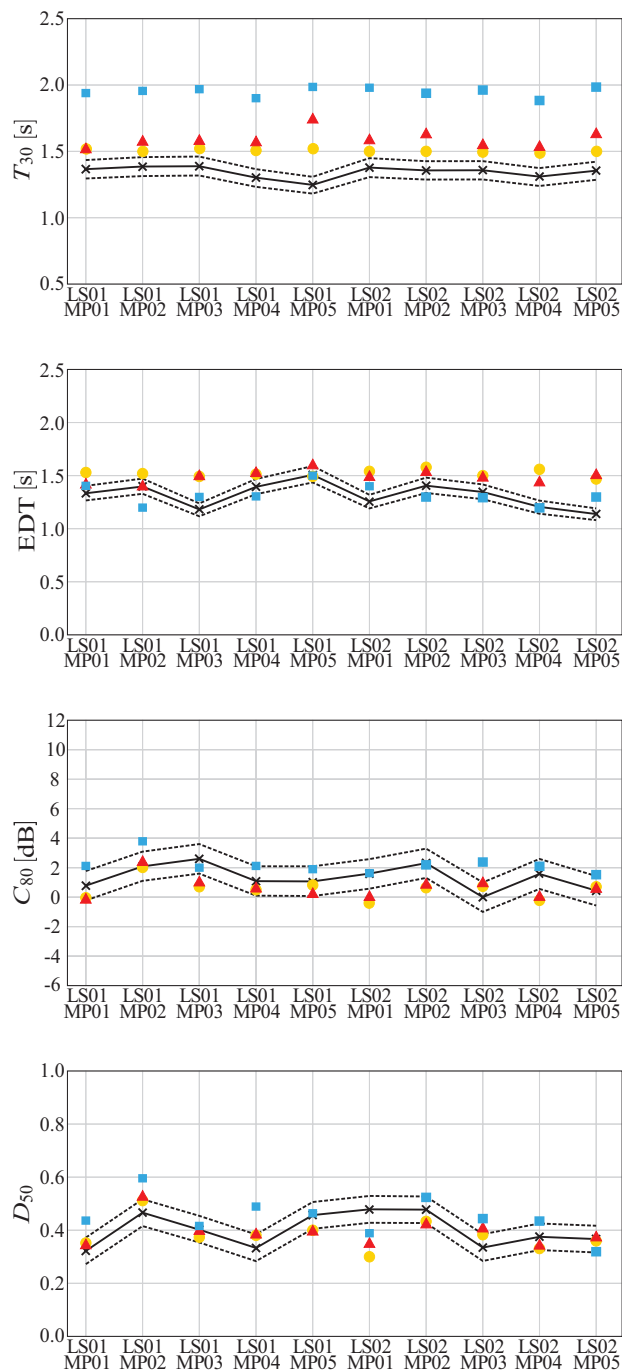


Figura 5: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 1 kHz.

Legenda: Medição (—x—), $\pm$ JND (---),
Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

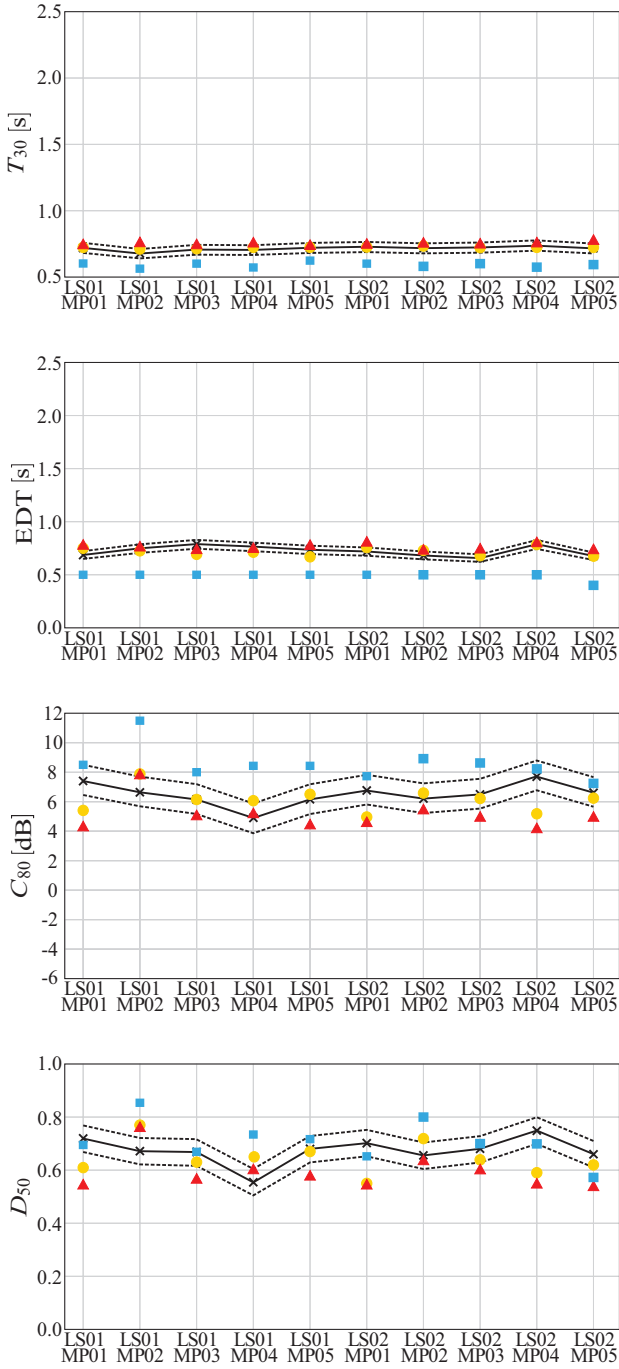


Figura 6: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 8 kHz.

Legenda: Medição ($\times$), $\pm$ JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

3.3 Erro médio relativo ao JND

Segundo o proposto por Bork [30], pode-se calcular a média do erro absoluto entre os parâmetros simulados e medidos, levando o JND em consideração. A vantagem desta métrica é que uma única escala de erro é considerada para todos os parâmetros acústicos. Além disso, também é possível estimar facilmente se tais erros representam

diferenças subjetivamente perceptíveis.

O erro médio relativo foi aqui calculado de duas maneiras diferentes: (i) tomando a média de todos os pares fonte-receptor em função da frequência, $\bar{E}(f)$ (Equação (2)); (ii) tomando a média de todas as bandas de frequência para cada par fonte-receptor, $\bar{E}_{sr}$, (Equação (3)), a saber

$$\bar{E}(f) = \frac{1}{\text{JND}(f)} \frac{1}{10} \sum_{p=1}^{N_{sr}} |x_{sp}(f) - x_{mp}(f)|, \quad (2)$$

$$\bar{E}_{sr} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} \frac{1}{\text{JND}_k} |x_{sk} - x_{mk}|. \quad (3)$$

Nas Equações (2) e (3), o índice p representa o par fonte-receptor, o índice k indica as bandas de frequência consideradas, x_s são os parâmetros acústicos obtidos por simulação, e x_m obtidos por medição. Aqui, o JND é sempre calculado em relação aos dados medidos. Na somatória, N_{sr} representa o número de pares fonte-receptor em uma dada simulação / experimento, e N_k o número de bandas de frequência [35].

Segundo o cálculo apresentado, tanto para $\bar{E}(f)$ quanto para $\bar{E}_{sr}$, um valor acima da unidade indica diferenças perceptíveis a um ser humano médio.

Na Figura 7 apresentam-se os valores de $\bar{E}(f)$, geralmente $\geq 1,0$ para quase todas as bandas de frequência. Odeon e RAVEN apresentaram desempenhos semelhantes, visto também que ambos possuem algoritmos com características em comum. Desempenhos inferiores foram observados para o RAIOS sobretudo no cálculo do T_{30} , e do EDT, nas frequências de 4 kHz e 8 kHz. O C_{80} e o D_{50} foram os parâmetros melhor representados por todos os programas. Existe também a tendência a melhores desempenhos para bandas de frequências superiores. Isso pode indicar que, para o cálculo em acústica geométrica, uma maior densidade modal seja necessária, não garantida no limite estabelecido pela frequência de Schroeder. Para o EDT, C_{80} e D_{50} , os desempenhos dos três programas foram semelhantes abaixo da banda de 2 kHz. Estes parâmetros possuem uma relação direta com a distribuição de energia da parte inicial da resposta impulsiva, que será melhor detalhada na Seção 3.4.

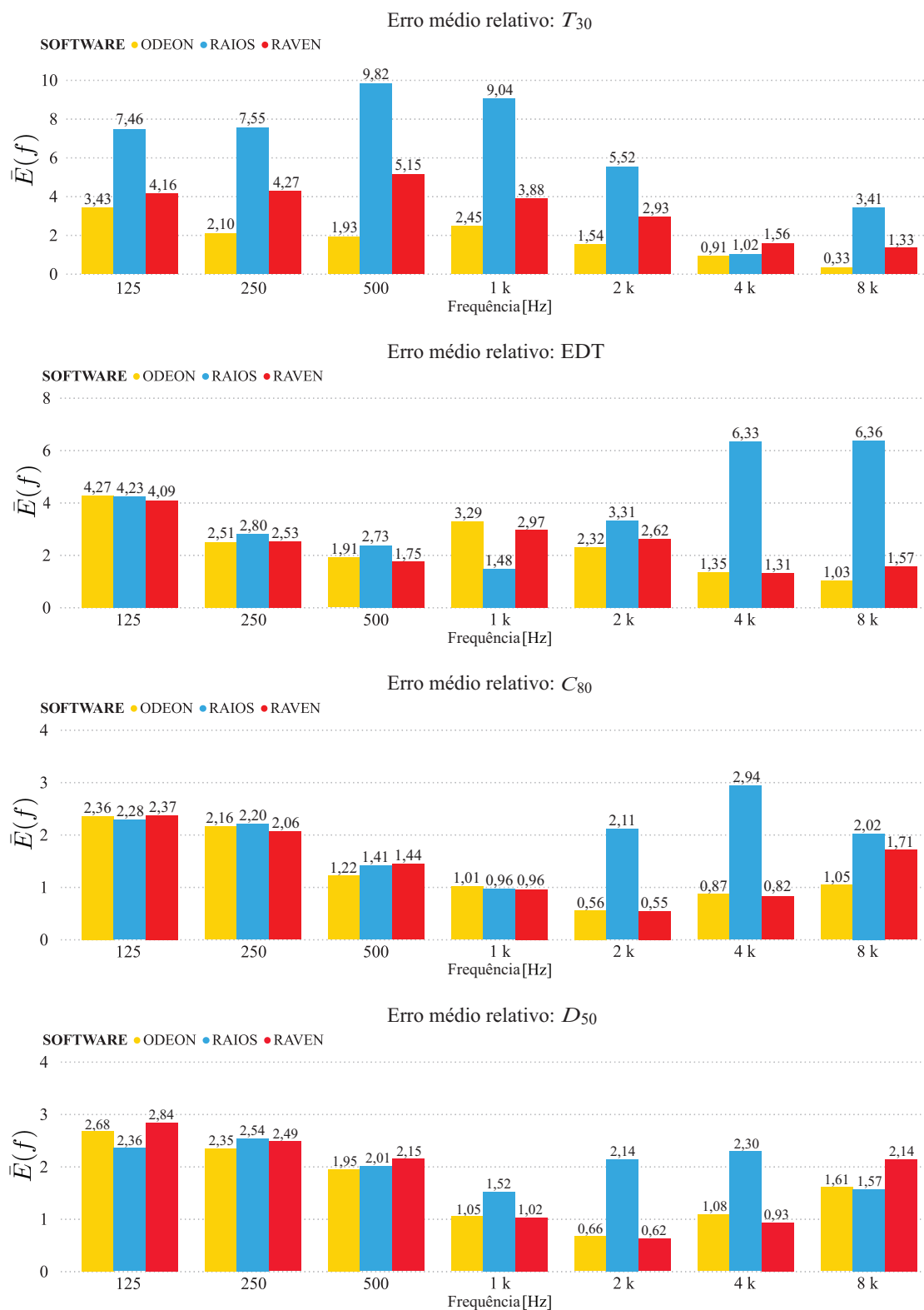


Figura 7: Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da frequência, na Sala 10 do RR4.

Na Figura 8, os valores de $\bar{E}_{sr}$ apresentados para todas as bandas de frequência, em função do par de fonte-receptor também entregaram resultados $\geq 1,0$ para a maioria dos casos. De acordo com o cálculo aqui empregado, para o T_{30} , o Odeon apresentou melhores resultados em todos os pares fonte/receptor. Para os demais parâmetros, na

maioria dos casos, os resultados entregues pelo Odeon também foram superiores, porém com menores diferenças entre os demais programas. Os valores encontrados para o C_{80} e D_{50} retornaram erros médios menores do que os encontrados para os parâmetros temporais.



Figura 8: Erro médio normalizado para todas as bandas de frequência, em função do par fonte-receptor, na Sala 10 do RR4.

3.4 Comparação entre as respostas impulsivas calculadas e medidas

Um estudo da resposta impulsiva quadrática monauricular é apresentado nesta seção. A parte inicial da $h^2(t)$ foi analisada na Figura 9. Uma sé-

rie de picos são observados, provavelmente resultantes de fortes reflexões especulares. Os três programas apresentam respostas consistentes, com o tempo e a amplitude, porém, com características diferentes.

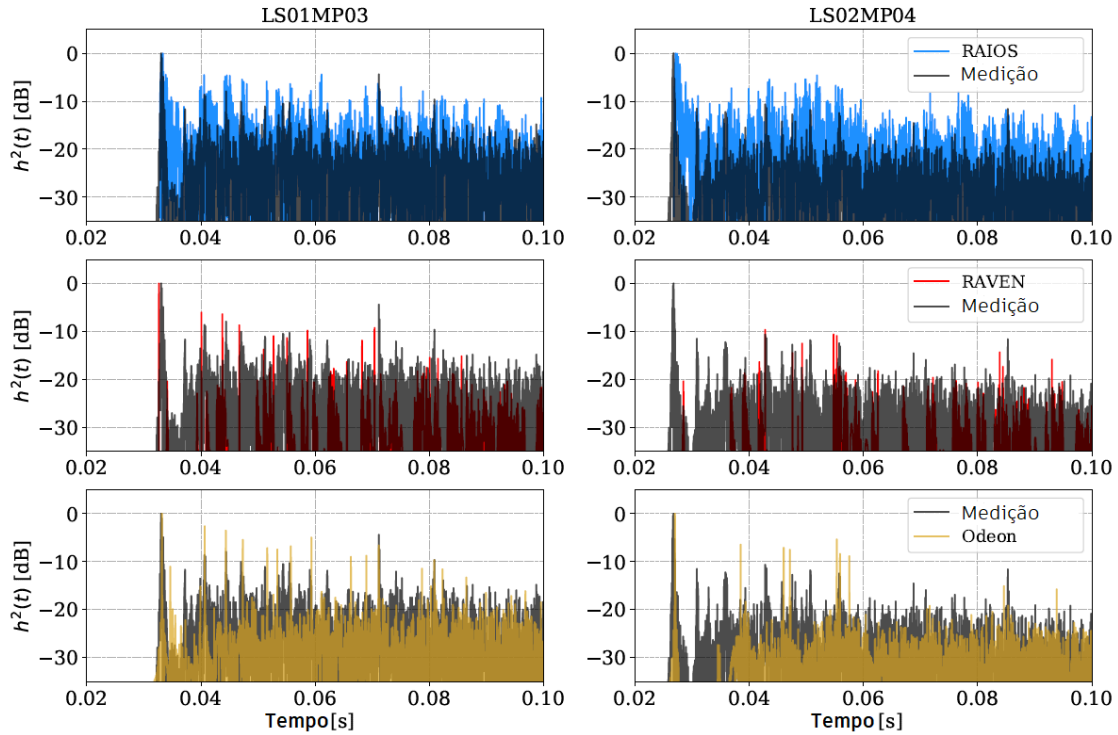


Figura 9: Comparação das respostas impulsivas monoauriculares para o par fonte/receptor LS01MP03 na coluna esquerda, e LS02MP04 na coluna direita (adaptado de Brandão et. al [35]).

Os intervalos de tempo entre essas reflexões especulares tende a ter a energia preenchida pelos fenômenos de espalhamento e a difração que ocorrem na sala. Ao utilizar o método de transição de energia, o *software* RAIOS tende a preencher essas lacunas de tempo com mais energia do que o registrado nos dados medidos, o que leva a uma curva decaimento com menor inclinação, havendo uma tendência a superestimar o T_{30} . Por outro lado, resulta em uma resposta impulsiva com cauda reverberante mais densa e natural. O *software* RAVEN estima níveis de energia mais baixos, apresentando lacunas entre as reflexões especulares, e o *software* Odeon se coloca de maneira intermediária entre o observado nos outros dois programas.

Embora os resultados apresentados pelo programa RAIOS na estimativa dos parâmetros não tenham sido os mais satisfatórios, o método de transição de energia utilizado pode ser benéfico caso o modelo ou os dados de entrada possam ser alterados de maneira a se obter um ajuste dos dados simulados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, o comportamento de três algoritmos de acústica geométrica, usados para a simulação acústica da propagação sonora no interior de ambientes, foi analisado. Quatro parâmetros acústicos foram avaliados: o tempo de reverberação (T_{30}), o tempo de decaimento inicial (EDT), a clareza (C_{80}) e a definição (D_{50}). Além disso, também se analisou a resposta impulsiva quadrática para uma das salas de referência do *Round Robin*, em sua quarta edição.

A partir das simulações, o T_{30} e o EDT foram os parâmetros cujos valores com relação aos dados experimentais apresentaram maiores desvios. Em oposição, os parâmetros de energia relativa, C_{80} e D_{50} , foram melhor avaliados. A variação espacial dos pares fonte-receptor não é bem representada pelos algoritmos. Para a maioria dos parâmetros, o erro médio relativo ao JND é maior que uma unidade, o que indica diferenças perceptíveis para seres humanos.

O Odeon e o RAVEN possuem modelos numéricos semelhantes, e os parâmetros calculados entregaram resultados similares. A avaliação das respostas impulsivas quadráticas revelaram que o RAVEN estima níveis mais baixos na parte inicial

da resposta impulsiva, o RAIOS computou um sinal com maior energia entre as reflexões especulares, e o Odeon teve um comportamento intermediário. A característica atribuída ao RAIOS se dá devido ao modelo utilizado para calcular a energia sonora espalhada, todavia, isso não resultou em uma boa avaliação dos parâmetros acústicos. Uma investigação de aspectos subjetivos na audição de sinais biauriculares está em curso.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr.-Ing. Lukas Aspöck e ao Institute of Technical Acoustics (ITA) da Aachen University, por gentilmente fornecerem acesso ao *software* RAVEN utilizado nesta pesquisa.

Também gostariam de reconhecer o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – bolsa n° 301024/2018-9), e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – bolsa n° 88887.488177/2020-00), pelo apoio financeiro parcial a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Magoulès, F. *Computational Methods for Acoustics Problems*. Glasgow: Saxe-Couburg, 2008.
- [2] Atalla, N. e Sgard, F. *Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2015.
- [3] Hargreaves, J.A.; Rendell, L.R. e Lam, Y.W. A framework for auralization of boundary element method simulations including source and receiver directivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145 (4):2625–2637, 2019.
- [4] Wu, T. W. *Boundary Element Acoustics: Fundamentals and Computer Codes*. Billerica, MA: Wit Press, 2000.
- [5] Bilbao, S.; Ahrens, J. e Hamilton, B. Incorporating source directivity in wave-based virtual acoustics: Time-domain models and fitting to measured data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146 (4):2692–2703, 2019.
- [6] Sakuma, T.; Sakamoto, S. e Otsuru, T. *Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics*. Tokyo: Springer, 2014.
- [7] Savioja, L. e Svensson, U.P. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(2):708–730, 2015.
- [8] Allred, John C. e Newhouse, Albert. Applications of the monte carlo method to architectural acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 30:1–3, 1958.
- [9] Schroeder, M.R.; Atal, B.S. e Bird, C. Digital computers in room acoustics. Em *4th ICA*, pág. M21, Copenhagen, 1962.
- [10] Schroeder, M. R. Computer models for concert hall acoustics. *American Journal of Physics*, 41(4):461–471, 1973. doi: [10.1119/1.1987272](https://doi.org/10.1119/1.1987272).
- [11] Blauert, J.; Lehnert, H.; Pompetzki, W. e Xiang, N. Binaural room simulation. *Acustica*, 72:295–6, 1990.
- [12] Ahnert, W. e Feistel, R. Binaural auralization from a sound system simulation programme. Em *91th AES Convention*, New York, 1991.
- [13] Lehnert, Hilmar e Blauert, Jens. Principles of binaural room simulation. *Applied Acoustics*, 36(3): 259–291, 1992. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/0003-682X\(92\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90049-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003682X9290049X>.
- [14] Møller, Henrik. Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, 36(3):171–218, 1992. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/0003-682X\(92\)90046-U](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90046-U). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003682X9290046U>.
- [15] Vian, Jean-Paul e Martin, Jacques. Binaural room acoustics simulation: Practical uses and applications. *Applied Acoustics*, 36(3):293–305, 1992. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/0003-682X\(92\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90050-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003682X92900503>.
- [16] Kleiner, M.; Dalenbäck, B. I. e Svensson, P. Auralization - an overview. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41(11):861–875, 1993.
- [17] Begault, D. 3-d sound for virtual reality and multimedia. Em *Academic Press Professional*, Cambridge, 1994.
- [18] Dalenbäck, B-I. e McGrath, D. Narrowing the gap between virtual reality and auralization. Em *15th ICA*, Trondheim, 1995.
- [19] Sottek, R. Virtual binaural auralization of product sound quality: Importance and application in practice. Em *EURONOISE*, Naples, 2003.
- [20] Rindel, Jens Holger; Otondo, Felipe e Christensen, Claus Lynge. Sound source representation for auralization. Em *International Symposium on Room Acoustics*, Awaji, 2004.
- [21] Torres, Julio Cesar; Petraglia, Mariane e Tenenbaum, Roberto. An efficient wavelet-based hrft model for auralization. *Acta Acustica united with Acustica*, 90: 108–120, 01 2004.
- [22] Otondo, Felipe e Rindel, Jens. A new method for the radiation representation of musical instruments in auralizations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91: 902–906, 09 2005.



- [23] Dalenbäck, B-I. e Strömberg, M. Real time walkthorough auralization – the first year. Em *IOA Spring Conference*, Copenhagen, 2006.
- [24] Summers, Jason E. What exactly is meant by the term “auralization?”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(2):697–697, 2008. doi: [10.1121/1.2945708](https://doi.org/10.1121/1.2945708). Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.2945708>.
- [25] Dalenbäck, B-I. *A new model for room acoustics prediction and auralization*. Tese de doutorado, Chalmers University, 1995.
- [26] Taminato, F. O. *Artificial neural networks applied to model head-related impulse responses to generate auralization*. Tese de doutorado, State University of Rio de Janeiro, 2018.
- [27] Savioja, Lauri e Xiang, Ning. Introduction to the special issue on room acoustic modeling and auralization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(4):2597–2600, 2019. doi: [10.1121/1.5099017](https://doi.org/10.1121/1.5099017).
- [28] Vorländer, Michael. Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(3):1203–1213, 2013. doi: [10.1121/1.4788978](https://doi.org/10.1121/1.4788978).
- [29] Vorländer, Michael. Round robin on room acoustical computer simulation. Em *15th ICA*, Trondheim, 1995.
- [30] Bork, I. A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Acta Acustica united with Acustica*, 86:943–956, 2000.
- [31] Bork, I. Report on the 3rd Round Robin on room acoustical computer simulations – Part I: Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4):740–752, 2005.
- [32] Bork, I. Report on the 3rd Round Robin on room acoustical computer simulations – Part II: Calculation. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4):753–763, 2005.
- [33] Brinkmann, Fabian; Aspöck, Lukas; Ackermann, David; Lepa, Steffen; Vorländer, Michael e Weinzierl, Stefan. A round robin on room acoustical simulation and auralization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(4):2746–2760, 2019. doi: [10.1121/1.5096178](https://doi.org/10.1121/1.5096178).
- [34] Aspöck, Lukas; Brinkmann, Fabian; Ackermann, David; Weinzierl, Stefan e Vorländer, Michael. BRAS - Benchmark for Room Acoustical Simulation. 2020. doi: [10.14279/depositononce-6726.3](https://doi.org/10.14279/depositononce-6726.3). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14279/depositononce-6726.3>.
- [35] Brandão, E.; Santos, E. S. O.; Melo, V. S. G.; Tenenbaum, R. A. e Mareze, P. H. On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation. *Applied Acoustics*, 187:484–495, 2022. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2021.108484](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108484).
- [36] *ISO 3382: Measurement of room acoustical parameters – Part 1: Performance spaces*. International Organization for Standardization, Geneva, 2009.
- [37] Oliveira, Sofia. Comparação entre medição e simulação utilizando distintos programas de simulação acústica de salas para dois ambientes diferentes. Santa Maria, RS, Brasil, 2021.
- [38] Odeon. Odeon room acoustics software: Odeon 11 features, Novembro 2019.
- [39] Odeon. User's manual - version 16, 2020.
- [40] Schröder, Dirk. Physically based real-time auralization of interactive virtual environments. *Logos Verlag Berlin GmbH*, 11, 2011. Disponível em: <http://publications.rwth-aachen.de/record/50580/files/3875.pdf>.
- [41] Schröder, Dirk e Vorländer, Michael. RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments. *Forum Acusticum*, págs. 1541–1546, 2011.
- [42] Aspöck, Lukas; Pelzer, Sönke; Wefers, Frank e Vorländer, Michael. A real-time auralization plugin for architectural design and education. *Proc. of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics*, 161:156–161, 2014. doi: [10.14279/depositononce-26](https://doi.org/10.14279/depositononce-26).
- [43] Tenenbaum, Roberto A. *RAIOS 7: Manual do usuário*. v. 7.12, 2019. Disponível em: <https://ratenenbaum.wixsite.com/acustica/raios-7>.
- [44] TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES, J. C. B. e GERGES, S. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustic: Part 1 – theoretical and numerical aspects. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, 29(2):211–221, 2007a.
- [45] TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES, J. C. B. e GERGES, S. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 – Validation of the computational code RAIOS 3. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, 29(2):222–231, 2007b.
- [46] Hak, C. C. J. M.; Wenmaekers, R. H. C. e Luxemburg, L. C. J. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, 98:907–915, September 2012. doi: [10.3813/AAA.918574](https://doi.org/10.3813/AAA.918574).
- [47] Schroeder, M. Die statistischen parameter der frequenzkurven von großen räumen. *Acta Acustica united with Acustica*, 4:594–600, 1954.
- [48] Kuttruff, H. e Schroeder, M. On frequency response curves in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(1):76–80, 1962.
- [49] Schroeder, M. Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms. *Jornal of the Audio Engineering Society*, 35(5):299–306, 1987.
- [50] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1^a ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.