

Validação de programa de simulação acústica de salas via inter-comparação internacional e aferição de inteligibilidade

Melo, V. S. G.^{1, 2} ; Tenenbaum, R. A.² ; Santos, E. S. O.² ; Soares, M. C.² ; Sampaio, G. R.¹ 

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS,
{viviane.melo, gabriel.sampaio}@eac.ufsm.br

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS,
ratenenbaum@gmail.com, sofia.oliveira@acad.ufsm.br, murilo.c.soares@outlook.com

Resumo

O artigo aborda a validação dos resultados de simulação do código computacional de acústica de salas RAIOS 7. O programa calcula as respostas impulsivas mono e biauriculares (RIR e BRIR), bem como os principais parâmetros de qualidade acústica em um recinto, para pares especificados fonte-receptor. A sala simulada é uma das utilizadas na última intercomparação internacional de simuladores. Para validar as respostas impulsivas monoauriculares e o cálculo dos parâmetros acústicos, resultados de simulação são comparados com resultados de outros programas e com dados de medição na sala, anteriormente publicados. O código em análise situa-se, na média, no terço superior entre o conjunto de programas de simulação acústica de salas participantes do certame. Para validar as respostas impulsivas biauriculares utilizam-se testes de articulação. São realizados ensaios de inteligibilidade em cinco salas de aula de diferentes dimensões. As salas são modeladas no código computacional de modo a gerar as respostas impulsivas biauriculares para pares fonte-receptor posicionados tal como na sala real. Os mesmos sinais sonoros utilizados nos testes reais são então convoluídos com as respostas impulsivas biauriculares simuladas, gerando auralizações. Testes de articulação são, finalmente, realizados a partir das auralizações e os seus resultados comparados com os testes conduzidos nas salas reais, indicando erros menores do que 5%.

Palavras-chave: simulação acústica de salas, validação de código computacional, comparação internacional, índices de articulação, auralização.

PACS: 43.55.-n, 43.55.Br, 43.55.Ka.

Validation of room acoustics simulation software using international intercomparison and intelligibility assessment

Abstract

The article addresses the validation of the simulation results of the RAIOS 7 room acoustics computational code. The software calculates monaural and binaural room impulse responses (RIR and BRIR), as well as the main acoustical quality parameters in an enclosure, for specified source-receiver pairs. The simulated room is one of those used in the last international inter-comparison of room acoustic simulators. In order to validate the monaural impulse responses and the calculation of acoustical parameters, simulation results are compared with results from other software and with previously published room measurement data. The considered software shows to stay, in average, in the upper third of the software set. To validate the binaural impulse responses, articulation tests are used. Intelligibility tests are carried out in five classrooms of different sizes. The rooms are modeled in the computer code in order to generate the binaural impulse responses for source-receiver pairs positioned as in the actual room. The same sound signals used in the real tests are then convolved with the simulated binaural room impulse responses, generating auralizations. Articulation tests are, finally, carried out from the auralizations and their results compared with the tests conducted in the actual rooms, indicating errors smaller than 5%.

Keywords: room acoustical simulation, software validation, international intercomparison, articulation scores, auralization.

1. INTRODUÇÃO

A simulação de campo acústico em recintos remonta aos trabalhos pioneiros de Allred e Newhouse [1] e de Schroeder [2]. Com o rápido desenvolvimento da tecnologia digital, a simulação numérica passou a desempenhar papel preponderante em projetos acústicos devido ao seu baixo custo e facilidade de introdução de alterações em projetos acústicos de salas. Mais recentemente, com o advento de técnicas de geração de auralização¹ [3], a simulação numérica passou a favorecer a imersão sonora do ouvinte em um ambiente virtual. Diversas dessas técnicas foram publicadas nos anos 1990 [4–8] e 2000 [9–13].

Contudo, a despeito do grande interesse despertado pela área de simulação em acústica de salas, a primeira pergunta que surge naturalmente é até que ponto os diversos algoritmos de simulação são capazes de prever com acurácia o campo acústico em um dado recinto. Buscando responder essa importante questão, foram criadas as intercomparações internacionais de simulação em acústica de salas, denominadas “*Round Robin*” (RR). A ideia básica desses certames é comparar as simulações produzidas por diferentes algoritmos com os dados de medições efetuadas nas salas reais. A participação é voluntária, as informações geométricas e acústicas das salas são fornecidas às equipes participantes e, ao final, após todos terem enviado seus resultados de simulação, são disponibilizados os dados de medição de modo às equipes participantes poderem avaliar a acurácia de seus algoritmos. Costumam participar dos RRs tanto equipes desenvolvedoras de programas de simulação acústica de salas como seus usuários.

A primeira dessas intercomparações ocorreu em 1994 [14]. O segundo RR foi lançado em 1999 [15] e o terceiro em 2004 [16, 17]. Finalmente,

¹O termo “auralização” — que consideramos mais adequado do que os termos, também utilizados, “auralização” e “audibilização” — provém do inglês “auralization”, que significa tornar audível. A opção dos autores se deve ao antepositivo “auri-”, que significa “orelha”, originando palavras como “auricular”, “aurícula”, “auriculista” etc.

em 2016, foi proposto o assim chamado primeiro *Round Robin* em simulação acústica de salas e auralização [18]. Esta última intercomparação envolveu nove salas em diversas configurações, caracterizando 25 cenários ao todo, fontes direcionais, variadas posições de fontes e receptores no interior dos recintos e demandou a simulação de um massivo número de respostas impulsivas mono e biauriculares, constituindo estas a grande novidade do certame, que teve como um de seus objetivos avaliar a capacidade dos programas em realizar a auralização das salas.

A grande maioria dos programas de simulação acústica de salas opera dentro das hipóteses da acústica geométrica [19], portanto, para a região acima da frequência de Schroeder. Isso significa dizer que as ondas sonoras que se propagam no ambiente podem ser tratadas como raios acústicos, ortogonais às frentes de onda [20]. Há dois métodos básicos para modelar raios acústicos: o método de traçado de raios [21] e suas variantes [22]; e o método das fontes virtuais [23]. Há, também, algoritmos que utilizam métodos híbridos, com o cálculo das primeiras reflexões via método das fontes virtuais e o restante da cauda reverberante utilizando o método de traçado de raios [24]. Em princípio, esses métodos lidam bem com as assim chamadas reflexões especulares, mas não são considerados acurados nas simulações das reflexões difusas [25].

As reflexões difusas desempenham um papel importante em simulação numérica de acústica de salas, particularmente quando sua auralização é desejada, promovendo maior uniformidade do campo sonoro [26]. Há diversas técnicas para modelar as reflexões difusas, sendo uma das mais utilizadas e bem-sucedidas a da modelagem por radiosidade, também conhecida como método das transições de energia [27].

Este artigo aborda a validação de resultados de simulação numérica de acústica de salas para o código computacional RAIOS 7, tanto quanto à obtenção de respostas impulsivas monoauriculares (RIRs) quanto à geração de respostas impulsivas biauriculares (BRIRs). Os critérios adotados para a validação de um programa de simula-

ção acústica são aqueles utilizados em todos os RRs, ou seja, para a validação de respostas impulsivas monoauriculares (RIRs), comparam-se os valores simulados dos parâmetros de qualidade acústica com os respectivos valores medidos; já para a validação das respostas impulsivas biauriculares os critérios variam, sendo que, neste trabalho, optou-se por comparar índices de articulação.

O artigo está estruturado como se segue. Na Seção 2, abordam-se as principais características do código computacional. Na Seção 3, apresentam-se os resultados comparativos de simulação do programa RAIOS 7 relativos às respostas impulsivas monoauriculares, tomando como referência o Cenário 10 utilizado no primeiro *Round Robin* em simulação acústica de salas e aurilização, sala que foi cuidadosamente medida pela equipe organizadora do certame. Na Seção 4, faz-se a validação das respostas impulsivas biauriculares simuladas pelo código. Para tal, comparam-se índices de articulação, obtidos a partir das BRIRs geradas pelo programa, com os índices de articulação reais, medidos em cinco salas distintas. Na Seção 5, é feita uma discussão dos resultados encontrados. Finalmente, a Seção 6 reúne as principais conclusões do presente estudo.

2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO CÓDIGO COMPUTACIONAL

O código computacional RAIOS, acrônimo de *Room Acoustics Integrated and Optimized Software* ou programa integrado e otimizado para simulação de acústica de salas, em tradução livre, deve o início de seu desenvolvimento a uma dissertação de mestrado [28]. Naquela ocasião, o programa calculava exclusivamente o campo acústico em regime permanente no interior de um dado recinto. Após diversas dissertações de mestrado [29–31] e teses de doutorado [32–34], o programa RAIOS chegou à sua versão 7, com o cálculo das BRIRs modelado por uma técnica de inteligência artificial, baseada em redes neurais artificiais [35, 36].

O programa RAIOS modela o campo acústico por meio de um método híbrido, no qual as re-

flexões especulares são calculadas por um algoritmo de traçado de raios e as reflexões difusas são obtidas por meio do método de transições de energia [27]. As reflexões especulares, a absorção sonora nas superfícies, função dos coeficientes de absorção, e a atenuação devida à propagação no ar são calculadas em uma primeira fase, resultando em uma resposta impulsiva especular. A cada reflexão, parte da energia é armazenada em uma matriz, função dos coeficientes de espalhamento, de modo a gerar a resposta impulsiva difusa [37]. Esta é calculada em uma segunda etapa e adicionada à resposta impulsiva anterior. O programa RAIOS participou, em sua versão 3, do *Round Robin 3* [38]. O programa RAIOS 7 calcula, em valores globais e por bandas de oitava entre 63 Hz e 16 kHz, 14 parâmetros de qualidade acústica, segundo a norma ISO 3382 [39–41], bem como a família de parâmetros acústicos biauriculares (IACF).

Para a determinação das respostas impulsivas biauriculares da sala, o código RAIOS utiliza uma técnica inovadora. Ao invés de se utilizar de um banco de dados de respostas impulsivas associadas à cabeça humana (HRIRs) e efetuar a operação de convolução entre cada raio acústico que chega ao receptor numa dada direção com a HRIR daquela direção, o programa lança mão de um outro banco de dados com redes neurais artificiais previamente treinadas para cada uma das 64.442 direções de chegada do raio sonoro. O espectro em nove bandas de oitava do raio acústico chegando ao receptor é utilizado como entrada da rede neural e a saída constituirá a HRIR filtrada para a direção considerada [42]. As diversas HRIRs filtradas são então atrasadas segundo o tempo de chegada do raio acústico e, após adicionadas, constituirão a resposta impulsiva biauricular (BRIR) da sala para o par fonte-receptor em consideração. O ganho é de custo computacional. Demonstrou-se que as BRIRs obtidas por meio do método das redes neurais artificiais são indiscerníveis daquelas obtidas via o método clássico da convolução, com um custo computacional de aproximadamente 10% do custo do método clássico, em virtude de operar exclusivamente no domínio do tempo [36].

3. VALIDAÇÃO DAS RIRS

Nesta seção, apresentam-se os resultados de validação das respostas impulsivas monoauriculares. A validação é realizada comparando-se os valores simulados para quatro parâmetros de qualidade acústica, a saber: tempo de reverberação, avaliado como T_{20} ; tempo de decaimento inicial, EDT; fator de clareza para música, C_{80} ; e definição para fala, D_{50} , com os valores medidos e os simulados pelos demais programas participantes do *Round Robin* em simulação acústica de salas e aurilização, cujos dados estão disponíveis em [43]. A sala utilizada como referência é o Cenário 10 do certame, que consiste em uma das salas da Konzerthaus, situada em Berlim, com um volume de, aproximadamente, 2.350 m^3 , veja Figura 1.



Figura 1: Sala de concertos utilizada para validação de resultados monoauriculares [43].

A Figura 2 ilustra a mesma sala tal como inserida no programa RAIOS 7, com a indicação das posições das fontes sonoras (icosaedros) e microfones onidirecionais (poliedros de 32 faces). A fonte sonora ativa (LS1) está indicada em vermelho; os receptores ativos (MP1, MP2, MP3 e MP4) estão indicados em verde. As demais fontes e microfones (inativos) estão indicados na coloração cinzenta.

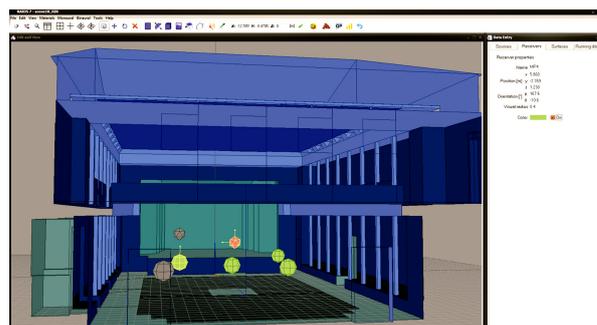


Figura 2: Cenário 10 do *round robin* com a posição de fontes sonoras e microfones.

A seguir, apresentam-se os resultados comparativos envolvendo os parâmetros acústicos acima referidos com seus resultados medidos, com indicação da margem da JND (sigla em inglês para *just noticeable difference* ou diferença do limiar perceptível), os valores simulados pelos *Software A, B, C, D, E e F*, não identificados em Brinkmann et al. [18], e os valores obtidos pelo programa RAIOS 7, indicado como R7. A Figura 3 indica a simbologia adotada nos gráficos das Figuras 4 a 19.



Figura 3: Simbologia adotada nos gráficos comparativos.

As Figuras 4 a 19 ilustram os resultados comparativos dos parâmetros T_{20} , EDT, C_{80} e D_{50} , computados pelos sete *software* indicados na Figura 3, bem como os respectivos valores medidos (linha sólida em preto), a região que compreende o JND [15], linha tracejada, e, para o tempo de reverberação, os valores calculados pela fórmula de Eyring [19], linha pontilhada. As Figuras 4 a 19 são adaptadas de Brinkmann et al. [18], naturalmente com a inclusão dos resultados simulados pelo *Software R7*. A identificação dos valores obedece à simbologia indicada na Figura 3.

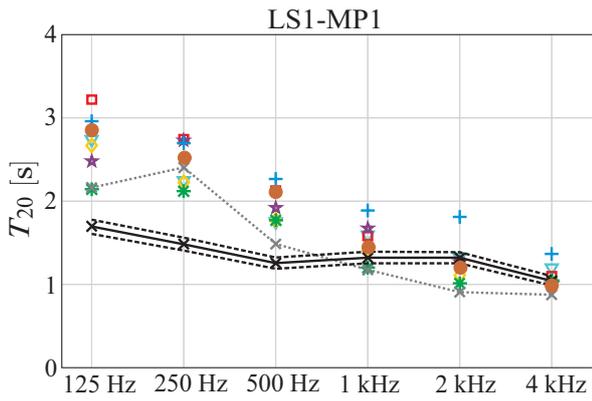


Figura 4: T_{20} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP1.

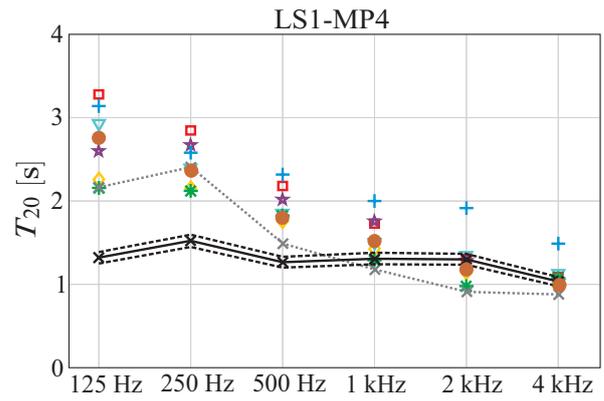


Figura 7: T_{20} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP4.

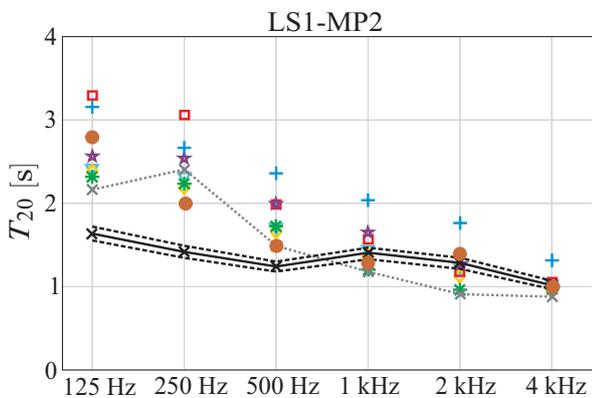


Figura 5: T_{20} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP2.

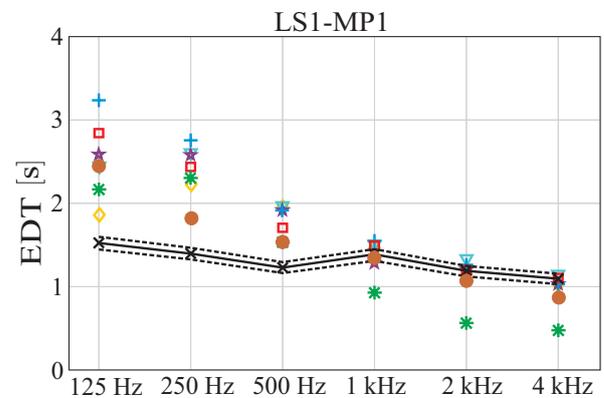


Figura 8: EDT em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP1.

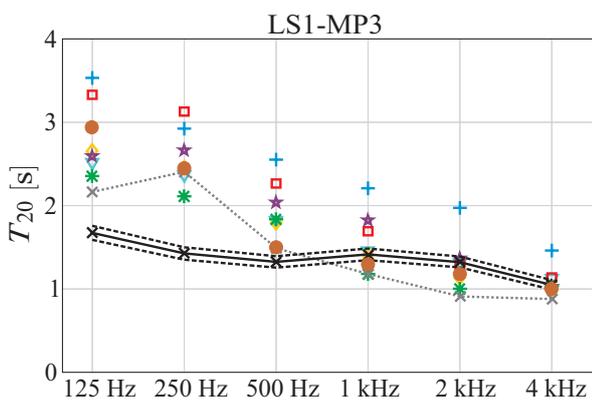


Figura 6: T_{20} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP3.

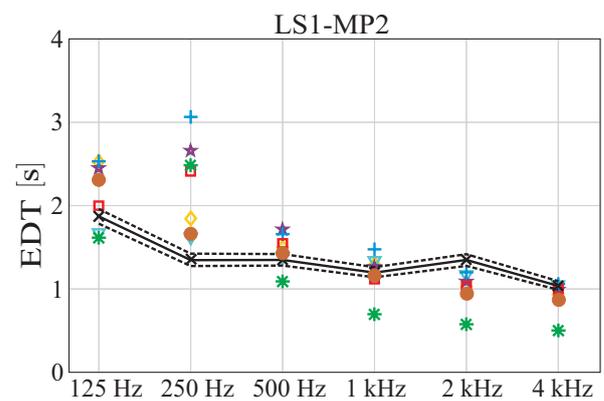


Figura 9: EDT em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP2.

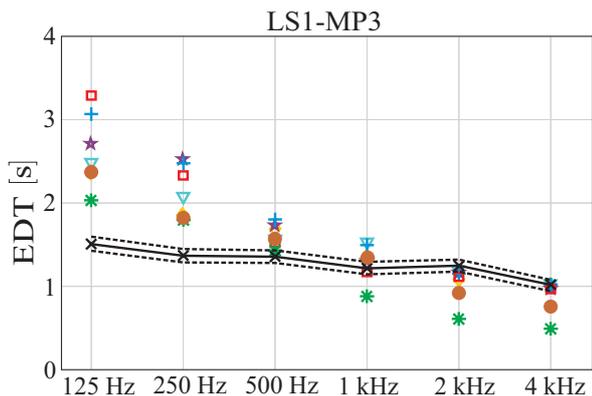


Figura 10: EDT em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP3.

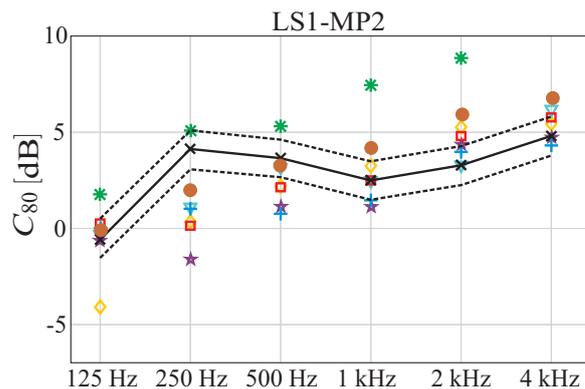


Figura 13: C_{80} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP2.

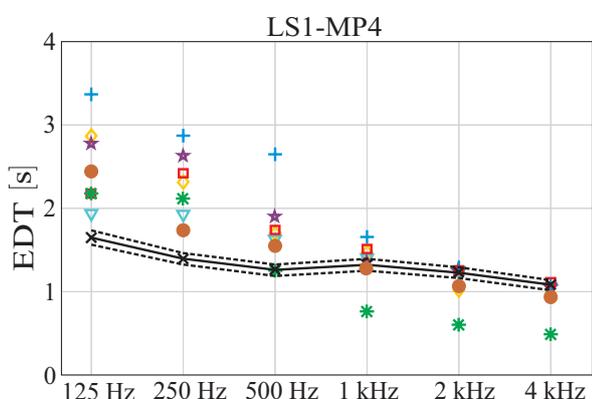


Figura 11: EDT em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP4.

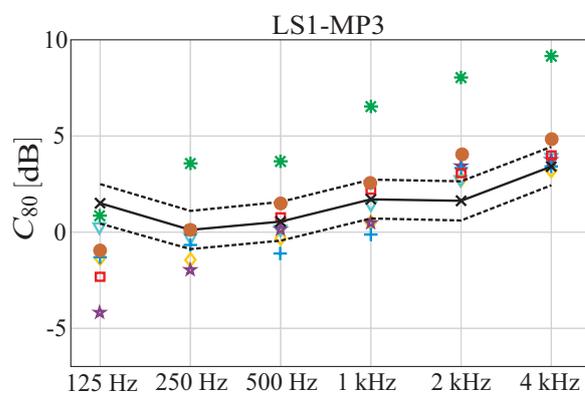


Figura 14: C_{80} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP3.

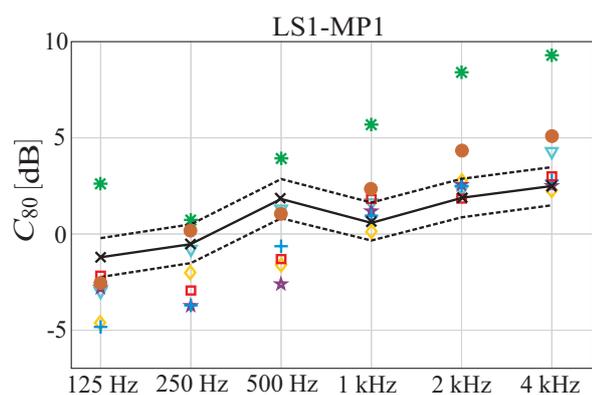


Figura 12: C_{80} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP1.

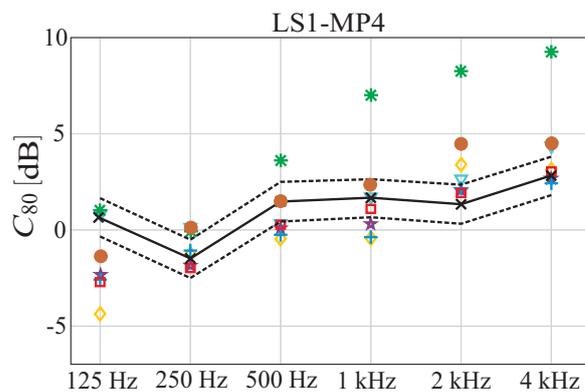


Figura 15: C_{80} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP4.

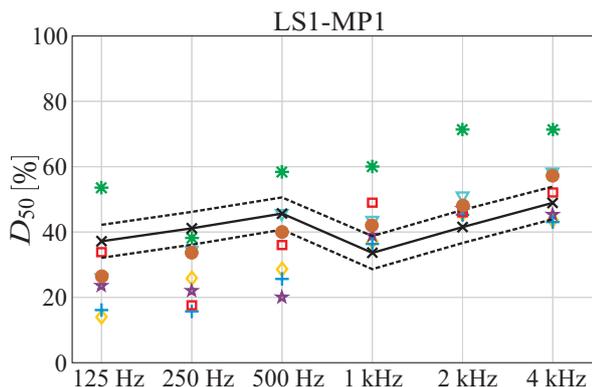


Figura 16: D_{50} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP1.

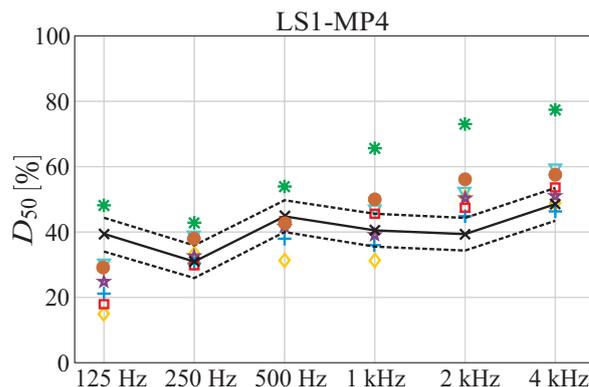


Figura 19: D_{50} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP4.

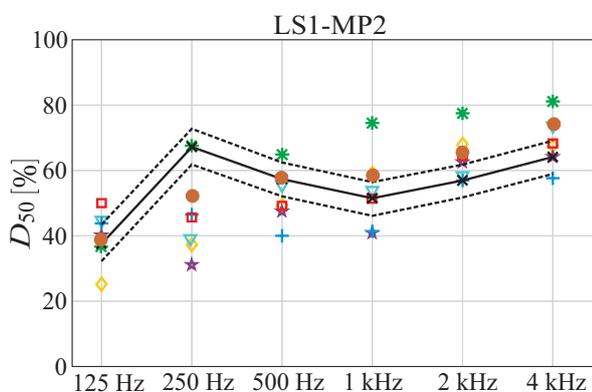


Figura 17: D_{50} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP2.

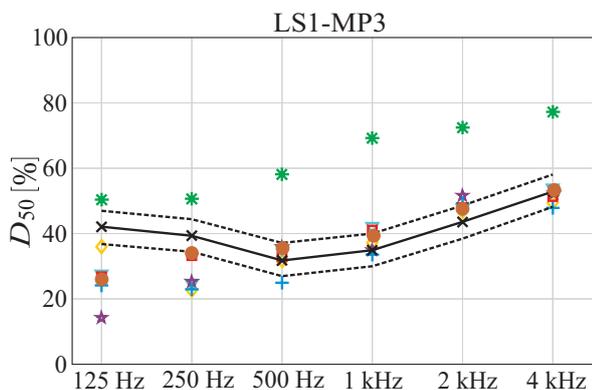


Figura 18: D_{50} em função da frequência para o par fonte-receptor LS1-MP3.

Objetivando classificar os sete programas de simulação quanto a seus respectivos desvios em relação aos dados oriundos de medição na sala considerada, foram calculados, para cada um dos quatro parâmetros simulados, as médias aritméticas dos módulos dos desvios, com respeito aos dados de medição, para as seis bandas de oitava e para os quatro pares fonte-microfone (média de 24 valores), segundo

$$\bar{D}(p) = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 |x_s(i, j) - x_m(i, j)|, \quad (1)$$

em que $\bar{D}(p)$ significa o desvio médio (para o parâmetro p), x_s corresponde ao dado simulado, x_m corresponde ao dado medido, i é o contador por banda de oitava e j é o contador para os pares fonte-microfone.

Os resultados são apresentados na Tabela 1. As médias dos desvios menores do que os obtidos para o programa R7 estão indicados em negrito; já as médias dos desvios maiores do que os obtidos para o programa R7 estão indicados em itálico na tabela.

Tabela 1: Médias dos desvios, com relação aos dados medidos, dos resultados de simulação fornecidos por cada um dos programas, para os parâmetros T_{20} , EDT, C_{80} e D_{50} .

	A	B	C	D	E	F	R7
T_{20} [s]	0,82	0,34	0,42	0,47	0,53	0,68	0,52
EDT [s]	0,68	0,62	0,37	0,54	0,52	0,52	0,37
C_{80} [dB]	1,8	4,3	1,7	1,1	1,8	1,6	1,5
D_{50} [%]	13,3	18,3	12,0	8,2	12,2	10,3	11,2

4. VALIDAÇÃO DAS BRIRS

Aurilizações constituem sinais sonoros a serem ouvidos por humanos e, como tal, envolvem aspectos eminentemente subjetivos e de caráter multidimensional para sua avaliação. Diversos esforços têm sido feitos para definir métricas para avaliar aurilizações, a mais completa delas consistindo no SAQI, um acrônimo em inglês para *Spatial Audio Quality Inventory* [44]. Trata-se de um repertório de 48 termos em língua inglesa para caracterizar a percepção subjetiva de um sinal de áudio. Os descritores estão classificados em oito categorias, como timbre, dinâmica e tonalidade, entre outros, utilizando-se de termos como “maior ou menor” ou “mais ou menos intenso” para classificar cada descritor, o que resulta em uma avaliação naturalmente subjetiva do sinal de áudio em análise. O SAQI foi utilizado por Brinkmann et al. [18], dentre outras técnicas, para avaliar as respostas impulsivas biauriculares geradas pelos programas participantes do primeiro *Round Robin* em simulação acústica de salas e aurilização, o que, naturalmente, exigiu o acesso à sala real em consideração. Contudo, poucas conclusões mais assertivas são extraídas da análise, a mais importante delas sendo o fato de que as simulações de todos os programas geraram, no domínio perceptual, aurilizações consideradas plausíveis, porém não autênticas [18].

Alguns autores têm seguido em outra direção, buscando uma métrica que gere um valor numérico a ser comparado. Este é o caso de se utilizar índices de articulação [42, 45–47] para avaliar as aurilizações geradas por simulação

numérica. O conceito básico é bastante simples. Comparam-se índices de articulação medidos na sala real, ou seja, com os participantes presentes na sala em estudo, com os índices de articulação obtidos pelos mesmos participantes ouvindo os sinais de aurilização gerados a partir da simulação das mesmas salas. Os sinais sonoros virtuais são avaliados por voluntários por meio de fones de ouvido e os dois índices de articulação são comparados. Estudos têm demonstrado [42, 45–50] que o índice de articulação pode ser utilizado como métrica para avaliar aurilizações.

O método adotado neste trabalho para a avaliação dos índices de articulação em salas é, essencialmente, aquele proposto por Melo [49]. Cinco salas de aula de médio porte (180 m² a 280 m²) são selecionadas; 36 voluntários jovens de ambos os sexos, estudantes universitários, realizam os testes de articulação tanto reais quanto aqueles gerados a partir das simulações, nas cinco salas. Para os testes reais, os voluntários são organizados em quatro grupos de nove pessoas, na forma como indicado na Figura 20. Para cada um desses grupos, o índice de articulação é avaliado pela média de acertos dos nove elementos do grupo no teste de articulação. A disposição adotada na sala é a de nove carteiras próximas, como indica a Figura 20, e cada um dos quatro grupos são distribuídos uniformemente na sala, guardando distância de pelo menos 1,5 m das paredes.

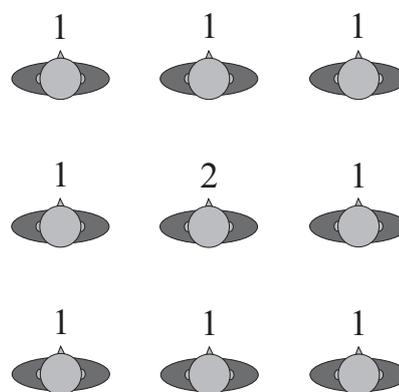


Figura 20: Arranjo de oito receptores (1) em torno de um nono receptor (2), tomado como referência para a simulação.

Listas com cem monossílabos, montadas a partir de um conjunto de 226 palavras monossilábicas gravadas na câmara anecoica da Divisão de Acústica e Vibrações do Inmetro, em Xerém, são emitidas pelo orador artificial, ilustrado na Figura 21. O orador artificial apresenta uma direcionalidade na emissão dos sinais sonoros bastante semelhante à da voz humana [48]. Cada um dos 36 voluntários anota o ditado de cem palavras, que é posteriormente corrigido pela equipe do projeto, responsável por assinalar o seu escore de acertos. Como mencionado, para cada grupo de nove voluntários é registrada uma média de acertos. A lista de palavras foi selecionada a partir de um estudo feito na faculdade de letras da UFRJ [51] e foi gravada por uma oradora do sexo feminino com sotaque carioca.



Figura 21: Orador artificial para a emissão dos sinais sonoros nos testes.

Cada uma das cinco salas é simulada no código computacional R7. Tempos de reverberação (T_{20}) são também medidos nas salas de modo a se ajustar ligeiramente os coeficientes de absorção dados como entrada no programa de simulação e estimados visualmente, otimizando, por esse procedimento, as simulações. As respostas impulsivas biauriculares são então calculadas pelo programa R7 para cada uma das cinco salas, com a posição da fonte sonora correspondendo à posição adotada pelo orador artificial e para cada uma das quatro posições correspondentes àquelas ocupadas pelo ouvinte

central, indicado como (2) na Figura 20.

De posse das 20 BRIRs simuladas, é feita a convolução do sinal sonoro de cada BRIR com o sinal sonoro anecoico contendo a lista de monossílabos, gerando assim as aurilizações por simulação. Utilizou-se o mesmo conjunto de palavras monossilábicas para os dois testes, porém com alteração na ordem dos monossílabos, de forma a evitar o reconhecimento de memória da sequência de palavras por parte dos participantes. A aurilização por simulação é submetida aos voluntários² por meio de fones de ouvido equalizados [52]. Todos os voluntários fizeram um teste simplificado de audiometria tonal limiar para confirmar a não existência de deficiências auditivas. Em todas as cinco salas o orador artificial foi posicionado no centro da mesa do professor, voltado para o público, com os quatro grupos de nove ouvintes distribuídos no recinto no padrão típico de ocupação de salas de aula. A Tabela 2 apresenta os resultados comparativos dos índices de articulação obtidos. Todos os valores estão em porcentagem. A “diferença” corresponde ao valor medido menos o valor simulado correspondente.

Tabela 2: Índices de articulação médios (medidos, simulados e diferença) para as quatro posições nas cinco salas de teste.

Sala	Real/ Virtual	P1	P2	P3	P4
S1	Medido	95	89	88	90
	Simulado	92	85	86	88
	Diferença	3	4	2	2
S2	Medido	90	84	86	80
	Simulado	86	80	83	78
	Diferença	4	4	3	2
S3	Medido	93	88	82	89
	Simulado	90	85	81	85
	Diferença	3	3	1	4
S4	Medido	80	81	78	80
	Simulado	78	80	75	77
	Diferença	2	1	3	3
S5	Medido	80	74	76	80
	Simulado	76	70	75	78
	Diferença	4	4	1	2

²Alunos de graduação da disciplina Acústica Aplicada.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pode-se depreender da Tabela 1 que, para o cálculo de T_{20} , o código computacional R7 situou-se em quarto lugar dentre os sete programas comparados, atrás dos *Software B*, *C* e *D*. Para o cálculo de D_{50} , o programa R7 colocou-se em terceiro lugar, atrás dos *Software D* e *F*. Já na avaliação de C_{80} , o código computacional R7 posicionou-se em segundo lugar, atrás somente do *Software D*. Finalmente, na simulação do parâmetro EDT, o código computacional R7 alcançou o primeiro lugar, juntamente com o *Software C*. No geral, observando-se atentamente a Tabela 1, depreende-se que, em termos de desvios em relação aos valores medidos, o código computacional RAIOS 7 encontra-se no terço superior do conjunto de sete programas de simulação, para essa sala de médio porte.

Alguns comentários cabem aqui sobre o desempenho do programa R7 no cálculo das respostas impulsivas monoauriculares. Primeiramente, os parâmetros acústicos que envolvem um balanço entre as energias inicial e reverberante da resposta impulsiva, como é o caso de C_{80} e D_{50} , parecem ser bem avaliados, apresentando um desvio menor que 12% no segundo caso e da ordem de 1,5 dB no primeiro. Isso significa que, provavelmente, a técnica híbrida utilizada no código R7 preenche adequadamente a resposta impulsiva da sala, para as distintas posições de fontes e receptores, equilibrando o som direto, as primeiras reflexões e as reflexões tardias tal como na sala real. O bom resultado obtido para o parâmetro EDT, indica que o código computacional R7 estima corretamente a curva de decaimento inicial da sala que, por sua vez, é obtida a partir da RIR pelo método clássico da integração reversa de Schroeder. Todavia, no cálculo do tempo de reverberação, as Figuras 4–7 mostram que houve sobrestimação do parâmetro para frequências abaixo de 1 kHz. Isso indica que o código R7 não captura corretamente o decaimento da sala no intervalo (-5, -25) dB, na região de baixa frequência. Contudo, é justamente na região de baixa frequência em que ocorre maior incerteza na medição do tempo de reverberação da sala, mesmo estando acima da frequência de Schroeder (cerca de 50 Hz).

Na validação das respostas impulsivas monoauriculares os resultados indicam que o programa R7 não consegue calcular com acurácia o parâmetro T_{20} , apresentando um desvio médio de 0,52 s, enquanto o *Software B*, que obteve o menor desvio nesse parâmetro, mostrou um desvio médio de 0,34 s e o *Software A* indicou um desvio médio de 0,84 s. Observando-se os gráficos das Figuras 4–7, nota-se que, efetivamente, o tempo de reverberação não é adequadamente capturado pelos diferentes algoritmos. Já no que toca à estimação de balanços energéticos entre as partes inicial e final das respostas impulsivas, caracterizados pelos parâmetros C_{80} e D_{50} , o desempenho de todos os programas foi melhor, com desvios nos valores de C_{80} menores do que 2 dB (excetuando-se o *Software B*), e com o programa R7 apresentando um desvio de 1,5 dB, maior apenas do que o desvio apresentado pelo *Software D*. Analogamente, os desvios no parâmetro D_{50} são menores do que 14% (novamente, excetuando-se o *Software B*) sendo o valor de desvio apresentado pelo programa R7 igual a 11,2%, o segundo menor, como mencionado. De forma talvez surpreendente, o tempo de decaimento inicial, estimado pelo parâmetro EDT, foi bastante bem avaliado pelo programa R7, com desvio médio com relação aos valores medidos de 0,37 s. Isso claramente indica que o algoritmo utilizado no código R7 captura adequadamente a parte inicial da curva de decaimento da sala em todas as bandas de frequência.

Na validação das respostas impulsivas biauriculares, verificou-se que em todas as 20 posições nas distintas salas o índice de articulação (IA) avaliado a partir dos dados de simulação mostrou-se sistematicamente menor do que o IA avaliado na sala real, com a diferença ficando entre 1% e 4% em qualquer caso. Verifica-se que a menor diferença entre os índices de articulação é de 1% (quatro incidências) e que a maior diferença é de 4% (seis incidências). Como todo o cuidado foi tomado no sentido de que não houvesse influência de ruído externo durante os testes reais, a hipótese aventada é de que faltam componentes de alta frequência nas respostas impulsivas biauriculares simuladas, dificultando um pouco a percepção perfeita de algumas con-

soantes. Contudo, isso ainda requer uma pesquisa mais focada nas funções de transferência correspondentes. Como o erro nos índices de articulação foram todos menores que 5%, valor considerado baixo [47], pode-se considerar que o modelo utilizado pelo programa R7 para modelar as funções de transferência associadas à cabeça humana, além de computacionalmente eficiente [36, 53] é fidedigno.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta os resultados de validação do código computacional RAIOS 7 de simulação numérica de campo acústico em salas com aurilização. A verificação das RIRs foi efetuada por meio de gráficos comparativos dos resultados de simulação de quatro parâmetros acústicos (T_{20} , EDT, C_{80} e D_{50}) com os valores medidos e os simulados pelos demais programas participantes do primeiro *Round Robin* em simulação acústica de salas e aurilização, para seis bandas de oitava e quatro pares de posições fonte-microfone no interior de uma das salas utilizada como referência naquele certame. Uma média sobre os módulos dos desvios é apresentado na Tabela 1, indicando um bom ranqueamento do código computacional em estudo com relação aos demais.

A validação das BRIRs foi realizada por meio de uma técnica de comparação de índices de articulação reais, levantados em cinco salas de aula, com índices de articulação obtidos a partir de simulações computacionais das referidas salas e obtenção das respostas impulsivas biauriculares nas mesmas posições fonte-microfone. O mesmo sinal sonoro é utilizado tanto nos testes de articulação reais quanto os virtuais, ou seja, aqueles realizados a partir de sinais de aurilização, apenas com uma alteração na ordenação das palavras. A conclusão geral que se pode extrair quanto à simulação das respostas impulsivas biauriculares é que promovem uma boa impressão espacial das salas, talvez com alguma pequena filtragem em alta frequência, tema ainda a ser melhor investigado.

O panorama geral que as Figuras 4 a 19 fornece parece indicar que os algoritmos dos *software*

que participaram do último *Round Robin* ainda demandam alguns aperfeiçoamentos. A dispersão apresentada pelos diferentes algoritmos, particularmente no cálculo do T_{20} na região de baixa frequência, mostra que as curvas de decaimento simuladas divergem significativamente das curvas medidas, ao menos na região entre 125 e 500 Hz. Observando que a frequência de Schroeder da sala em questão é de cerca de 50 Hz, está descartada a influência dos modos da sala, portanto, as hipóteses da acústica geométrica — utilizadas por todos os softwares — pode ser considerada plenamente válida.

Um outro aspecto a ser considerado, diz respeito aos dados de entrada dos *software*. Qualquer programa de simulação acústica de salas tem seus resultados de simulação fortemente dependentes dos dados de entrada, em particular, dos coeficientes de absorção e espalhamento. Nos *Round Robins*, esses coeficientes são medidos *in loco*. Os valores obtidos, a despeito do aperfeiçoamento contínuo das técnicas de medição, apresentam ainda um alto grau de incerteza [54]. Acreditamos que enquanto essa incerteza de medição não for reduzida, possivelmente os algoritmos de simulação acústica de salas ainda apresentarão discrepâncias observáveis com relação aos dados medidos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento à pesquisa que financiaram parcialmente o presente trabalho: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, (Proc. n° 301204/2018-9); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes (Proc. n° 88887.488177/2020-00); e Fundo de Incentivo à Pesquisa – FIPE 2020 e FIPE 2021 – UFSM (Proj. n° 053573).

REFERÊNCIAS

1. ALLRED, John C.; NEWHOUSE, Albert. Applications of monte carlo method to architectural acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 30, n. 1, p. 1–3, 1958. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.1909368](https://doi.org/10.1121/1.1909368).

2. SCHROEDER, Manfred R.; ATAL, Bishnu S.; BIRD, C. Digital computers in room acoustics. In: *Proceedings of the 4th International Congress on Acoustics*. Copenhagen, Dinamarca: [s.n.], 1962. p. M21.1–M21.4. Disponível em: <https://soundandscience.de/node/569>.
3. AHNERT, Wolfgang; FEISTEL, Rainer. Binaural auralization from a sound system simulation programme. In: *AES 91st Convention*. New York, NY, EUA: [s.n.], 1991. Disponível em: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5589>.
4. BLAUERT, Jens; LEHNERT, Hilmar; POMPETZKI, W.; XIANG, Ning. Binaural room simulation. *Acustica*, v. 72, p. 295–296, 1990.
5. LEHNERT, Hilmar; BLAUERT, Jens. Principles of binaural room simulation. *Applied Acoustics*, v. 36, n. 3, p. 259–291, 1992. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/0003-682X\(92\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90049-X).
6. KLEINER, Mendel; DALENBÄCK, Bengt-Inge; SVENSSON, Peter. Auralization – an overview. *Journal of The Audio Engineering Society*, v. 41, p. 861–875, 1993. Disponível em: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6976>.
7. BEGAULT, Durand R. *3-D sound for virtual reality and multimedia*. Cambridge: Academic Press Professional, 1994. ISBN 978-0120847358.
8. DALENBACK, Bengt-Inge; MCGRATH, David. Narrowing the gap between virtual reality and auralization. In: *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics*. Trondheim, Noruega: [s.n.], 1995. v. 2, p. 429–432. Disponível em: <https://www.icacommission.org/Proceedings/ICA1995Trondheim/ICA15%20Proceedings%20Vol2.pdf>.
9. SOTTEK, Roland. Virtual binaural auralization of product sound quality: Importance and application in practice. In: *Proceedings of the 5th European Conference Noise Control – EURONOISE*. Naples, Italy: [s.n.], 2003. Disponível em: https://global.head-acoustics.com/downloads/publications/sound_quality/Euronoise2003_Virtual_Binaural_Auralisation.pdf.
10. TORRES, Julio C. B.; PETRAGLIA, Mariane R.; TENENBAUM, Roberto A. An efficient wavelet-based HRTF for auralization. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 90, n. 1, p. 108–120(13), 2004. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaua/2004/00000090/00000001/art00014>.
11. OTONDO, Felipe; RINDEL, Jens H. A new method for the radiation representation of musical instruments in auralizations. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 91, n. 5, p. 902–906(5), 2005. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaua/2005/00000091/00000005/art00011>.
12. DALENBÄCK, Bengt-Inge; STROMBERG, M. Real time walkthrough auralization – the first year. In: *1st IOA Annual Conference*. Copenhagen, Denmark: [s.n.], 2006. v. 28 (2). Disponível em: <http://www.catt.se/Walker-IOA-Copenhagen-2006.pdf>.
13. SUMMERS, Jason E. ‘What exactly is meant by the term ‘auralization?’’. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 124, n. 2, p. 697–697, 2008. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.2945708](https://doi.org/10.1121/1.2945708).
14. VORLÄNDER, Michael. International round robin on room acoustical computer simulation. In: *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics*. Trondheim, Norway: [s.n.], 1995. p. 689–692.
15. BORK, Ingolf. A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 86, n. 6, p. 943–956(14), 2000. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaua/2000/00000086/00000006/art00008>.
16. BORK, Ingolf. Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulations — Part I: Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 91, n. 4, p. 740–752(13), 2005. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaua/2005/00000091/00000004/art00013>.

[//www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aa/ua/2005/00000091/00000004/art00015](https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aa/ua/2005/00000091/00000004/art00015).

17. BORK, Ingolf. Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulations – Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 91, n. 4, p. 753–763(11), 2005. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aa/ua/2005/00000091/00000004/art00016>.

18. BRINKMANN, Fabian; ASPÖCK, Lukas; ACKERMANN, David; LEPA, Steffen; VORLÄNDER, Michael; WEINZIERL, Stefan. A round robin on room acoustical simulation and auralization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 145, n. 4, p. 2746–2760, 2019. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.5096178](https://doi.org/10.1121/1.5096178).

19. KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics*. 5. ed. Madison Avenue, New York, USA: Spon Press, 2009. ISBN 978-0-07-160333-1.

20. SAVIOJA, Lauri; SVENSSON, U. Peter. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 138, n. 2, p. 708–730, 2015. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.4926438](https://doi.org/10.1121/1.4926438). Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.4926438>.

21. KROKSTAD, Asbjörn; STROM, S.; SORS-DAL, Svein. Calculating the acoustical room response by the use of ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, v. 8, n. 1, p. 118–125, 1968. ISSN 0022-460X. doi: [10.1016/0022-460X\(68\)90198-3](https://doi.org/10.1016/0022-460X(68)90198-3).

22. FARINA, Angelo. Pyramid tracing vs ray tracing for the simulation of sound propagation in large rooms. *WIT Transactions on the Built Environment*, v. 10, p. 109–116, 1995. ISSN 1743-3509. Disponível em: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/11/10132>.

23. BORISH, Jeffrey. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 75, p. 1827–1836, 1984. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.390983](https://doi.org/10.1121/1.390983).

24. VORLÄNDER, Michael. Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 86, n. 1, p. 172–178, 1989. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.398336](https://doi.org/10.1121/1.398336).

25. DALENBÄCK, Bengt-Inge; KLEINER, Mendel; SVENSSON, Peter. A macroscopic view of the diffuse reflection. *Journal of The Audio Engineering Society*, v. 42, n. 10, p. 973–987, 1994. Disponível em: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6927>.

26. COX, Trevor J.; DALENBÄCK, Bengt-Inge; D'ANTONIO, Peter; EMBRECHTS, Jean J.; JEON, Jin Y.; MOMMERTZ, Eckard; VORLÄNDER, Michael. A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 92, n. 1, p. 1–15(15), 2006. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aa/ua/2006/00000092/00000001/art00002>.

27. ALARCÃO, Diogo; BENTO-COELHO, José L.; TENENBAUM, Roberto A. On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach. In: *EEA Symposium on Architectural Acoustics*. Madrid, Spain: [s.n.], 2000.

28. BALLESTEROS, Marcos L. *Simulação numérica de acústica de salas*. (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1991. Disponível em: https://w1files.solucioatrio.net.br/atrio/ufrj-pem_upl//THESIS/1660/pemufrj1991mscmarcosdelimaballesteros_20150825122313512.pdf.

29. PINTO, Fábio A. V. *Audição biauricular: um protótipo*. (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEP/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

30. CAMILO, Thiago S. B. *Método híbrido para simulação de acústica de salas: combinação dos métodos de traçado de raios e transição de energia*. (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

31. NARANJO, José F. L. *Aperfeiçoamentos no código computacional RAIOS incluindo aurilização*. (Dissertação de Mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PPGMC/IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2010. Disponível em: <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/13844>.
32. TORRES, Júlio C. B. *Sistema de auralização eficiente utilizando transformadas wavelet*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/teses-de-doutorado/2004/2004037002-2004037002/file>.
33. NARANJO, José F. L. *Inteligência computacional aplicada na geração de respostas impulsivas biauriculares e em aurilização de salas*. Tese (Doutorado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PPGMC/IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2014. Disponível em: <http://www.bdttd.uerj.br/handle/1/13684>.
34. TAMINATO, Filipe O. *Redes neurais artificiais aplicadas à modelagem de HRIRs/HRTFs para gerar aurilização*. Tese (Doutorado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PPGMC/IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2018. Disponível em: <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/13714>.
35. HAYKIN, Simon. *Neural Networks and Learning Machines*. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2009. ISBN -13:978-0-13-147139-9.
36. TENENBAUM, Roberto A.; TAMINATO, Filipe O.; MELO, Viviane S.G. Fast auralization using radial basis functions type of artificial neural network techniques. *Applied Acoustics*, v. 157, p. 106993, 2020. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2019.07.041](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.07.041).
37. TENENBAUM, Roberto A.; CAMILO, Thiago S.; B., Julio C.; TORRES; GERGES, Samir N. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 1 - theoretical and numerical aspects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, p. 211–221, jun. 2007. ISSN 1678-5878. doi: [10.1590/S1678-58782007000200012](https://doi.org/10.1590/S1678-58782007000200012).
38. TENENBAUM, Roberto A.; CAMILO, Thiago S.; TORRES, Julio C. B.; STUTZ, Leonardo T. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 – validation of the computational code RAIOS 3. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, p. 211–221, 2007. ISSN 1678-5878. doi: [10.1590/S1678-58782007000200013](https://doi.org/10.1590/S1678-58782007000200013).
39. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. *ISO 3382: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*. Geneva, 2009. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/40979.html>.
40. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. *ISO 3382: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*. Geneva, 2008. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/36201.html>.
41. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. *ISO 3382: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices*. Geneva, 2012. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/46520.html>.
42. TENENBAUM, Roberto A.; TAMINATO, Filipe O.; MELO, Viviane S. G.; TORRES, Julio C. B. Auralization generated by modeling HRIRs with artificial neural networks and its validation using articulation tests. *Applied Acoustics*, v. 130, p. 260–269, 2018. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2017.09.025](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.09.025).
43. ASPÖCK, Lukas; BRINKMANN, Fabian; ACKERMANN, David; WEINZIERL, Stefan; VORLÄNDER, Michael. (Repositório), *GRAS – Ground Truth for Room Acoustical Simulation*. 2018. doi: [10.14279/depositonce-6726](https://doi.org/10.14279/depositonce-6726).
44. LINDAU, Alexander; ERBES, Vera; LEPA, Steffen; MAEMPEL, Hans-Joachim; BRINKMAN, Fabian; WEINZIERL, Stefan. A spatial audio quality inventory for virtual acoustic environments (SAQI). *Acta Acustica united with Acustica*, v. 100, n. 5,

p. 984–994(11), 2014. ISSN 1610-1928. doi: <https://doi.org/10.3813/AAA.918778>.

45. PENG, Jianxin. Feasibility of subjective speech intelligibility assessment based on auralization. *Applied Acoustics*, v. 66, n. 5, p. 591–601, 2005. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2004.08.006](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.08.006).

46. YANG, Wonyoung; HODGSON, Murray. Validation of the auralization technique: Comparative speech intelligibility tests in real and virtual classrooms. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 93, n. 6, p. 991–999(9), 2007. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaua/2007/00000093/00000006/art00013>.

47. HODGSON, Murray; YORK, Natalie; YANG, Wonyoung; BLISS, Mark. Comparison of predicted, measured and auralized sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using catt-acoustic and odeon. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 94, n. 6, p. 883–890(8), 2008. ISSN 1610-1928. doi: <https://doi.org/10.3813/AAA.918106>.

48. MELO, Viviane S. G.; TENENBAUM, Roberto A.; MUSAFIR, Ricardo E. Intelligibility assessment in elementary school classrooms from binaural room impulse responses measured with a childlike dummy head. *Applied Acoustics*, v. 74, p. 1436–1447, 2013. ISSN 0003-682X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.06.005>.

49. MELO, Viviane S. G.; TENENBAUM, Roberto A.; NARANJO, José F. L. A new approach to validate computer modeling auralizations by using articulation indexes. *Acústica e Vibrações*, v. 46, p. 1–8, 2014. ISSN 2764-3611, 1983-442X.

50. TENENBAUM, Roberto A.; TAMINATO, Filipe O.; MELO, Viviane S. G. Validating auralizations by using articulation indexes. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA) of the 22nd International Congress on Acoustics*. Buenos Aires, Argentina: [s.n.], 2016. doi: <https://doi.org/10.1121/2.0000318>.

51. ALCAIM, Abraham; SOLEWICZ, Jose A.; MORAES, Joao A. Frequência de ocorrência dos fones e listas de frases foneticamente balanceadas no português falado no Rio de Janeiro. *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, v. 7, n. 1, p. 23–41, 1992. Disponível em: <https://jcis.sbrt.org.br/jcis/article/download/166/80>.

52. MELO, Viviane S. G. *Avaliação de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental a partir de respostas impulsivas biauriculares obtidas com cabeça artificial de dimensões infantis*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEM/COPPE/UFRRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2012. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrrj-pem_upl//THESIS/3/pemufrj2012dscviviane_suzeygomesdemelo.pdf.

53. TAMINATO, Filipe O.; TENENBAUM, Roberto A.; MELO, Viviane S. G. Técnica rápida para geração de auralizações utilizando redes neurais artificiais. *Acústica e Vibrações*, v. 50, p. 25–38, 2018. ISSN 2764-3611, 1983-442X.

54. MÜLLER-TRAPET, Markus; VORLÄNDER, Michael. Uncertainty analysis of standardized measurements of random-incidence absorption and scattering coefficients. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 137, n. 1, p. 63, 2015. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.4904512](https://doi.org/10.1121/1.4904512).