

Resultados comparativos para a Sala 10 do Round Robin 4 obtidos pelo código computacional RAIOS 7

Tenenbaum, R. A.¹; Taminato, F. O.²; Melo, V. S. G.³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, ratenenbaum@gmail.com

²Laboratório de Instrumentação em Dinâmica, Acústica e Vibrações - LIDAV, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, RJ, filipeot@gmail.com

³Engenharia Acústica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, viviane.melo@eac.ufsm.br

Resumo

Este artigo descreve e analisa uma pequena parcela dos resultados obtidos pelo programa de simulação numérica de acústica de salas RAIOS 7 na primeira intercomparação internacional de programas de simulação, com auralização, denominado Round Robin 4 (RR4). Esta foi a mais completa intercomparação internacional, promovida e organizada por duas universidades alemãs, e que contou com nove salas simuladas, totalizando um conjunto de 25 configurações distintas. Este trabalho mostra a estrutura geral do RR4, apresenta a versão atual do programa e discute os resultados monoauriculares obtidos pelo código RAIOS 7, comparados aos dados de medição feitos pela equipe do RR4, para cinco pares fonte-microfone em uma das salas, na forma de alguns parâmetros de qualidade acústica, a saber: T_{20} , EDT, C_{80} e D_{50} por bandas de oitava. Evidencia-se que há desvios em relação aos valores medidos em todos os parâmetros, para as cinco posições, principalmente em baixas frequências. Em seguida, apresentam-se, para um par fonte-microfone, os desvios com respeito aos valores medidos dos demais programas participantes no RR4. Verifica-se que os desvios observados no código RAIOS 7 estão no terço inferior dos desvios dos demais programas de simulação de acústica de salas.

Palavras-chave: código computacional RAIOS 7, Round Robin 4, respostas impulsivas monoauriculares, simulação de acústica de salas, parâmetros de qualidade acústica.

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

Comparative results for Room 10 of Round Robin 4 obtained by the software RAIOS 7

Abstract

This paper describes and analyzes a small portion of the results obtained by the RAIOS 7 room acoustics numerical simulation software in the first international intercomparison of simulation software, with auralization called Round Robin 4 (RR4). This was the most complete international intercomparison, promoted and organized by two German universities, and nine rooms, totaling 25 different configurations were given for simulation. This paper shows the general structure of RR4, presents the current version of the software and discusses the monaural results obtained by RAIOS 7 code, compared to the measurement data made by the RR4 team, for five source-microphone pairs in the room called Scene 10, in the form of some acoustic quality parameters, namely: T_{20} , EDT, C_{80} and D_{50} by octave bands. The results evidence that there are deviations from the measured values in all parameters for the five positions, especially at low frequencies. Then, for one source-microphone pair, the deviations with respect to the measured values of the other software participating in RR4 are presented. It is shown that the observed deviations obtained by RAIOS 7 code are in the lower third of the deviations of the other room acoustics simulation software.

Keywords: computational code RAIOS 7, Round Robin 4, room impulse responses, room acoustics simulation, room acoustics quality parameters.

1. INTRODUÇÃO

A simulação numérica de campo acústico é uma ferramenta de projeto que vem sendo desenvolvida há mais de vinte anos. A eficiência e a confiabilidade das simulações vêm crescendo com a sofisticação dos algoritmos de simulação numérica e sistematicamente se beneficiando do avanço da tecnologia dos computadores pessoais.

Para se melhor avaliar a capacidade de reproduzir mais ou menos fielmente o campo acústico em salas, foram criados, a partir de 1994, as intercomparações internacionais entre programas de simulação, denominados *Round Robin* (RR). A ideia é disponibilizar os dados de uma ou mais salas na Internet, a partir de um grupo organizador do certame, e recolher os resultados das simulações fornecidos pelos times participantes. Ao final das simulações, os dados medidos, bem como os dados calculados pelos diversos times são divulgados para fins de comparação. Para garantir o máximo interesse na participação, às equipes são atribuídos números ou letras, ficando restrito o conhecimento dos nomes das equipes e programas participantes exclusivamente à equipe organizadora do certame.

O primeiro *Round Robin* (RR1) ocorreu em 1994 e demandava a simulação de uma pequena sala de palestras e apenas na banda de oitava de 1 kHz [1]. O RR2, que teve início em 1998, envolveu a simulação do *Helmia Hall*, em Jönköping, Suécia, uma sala multiuso, e não se mostrou muito bem-sucedido devido à complexidade da sala e à relativa inaptidão dos programas de simulação de salas à época [2]. O RR3, ocorrido a partir de 2002, envolveu um estúdio de música do PTB – *Physikalisch Technische Bundesanstalt*, o instituto metro-lógico alemão, em duas configurações, cortinas abertas e cortinas fechadas e teve a participação de 21 times [3]. O código computacional proprietário RAIOS (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*), na época em sua Versão 3, participou do RR3, tendo obtido excelentes resultados comparativos em termos dos erros médios

relativos entre os parâmetros de qualidade acústica calculados pelo simulador e aqueles medidos [4,5].

Contudo, só bem mais recentemente essa ferramenta computacional incorporou o que podemos chamar de realidade virtual acústica (RVA) ou, mais precisamente, de *aurilização* [6]. Aurilização é a técnica de gerar som audível a partir de dados numéricos. Permite, portanto, que se ouça, geralmente utilizando fones de ouvido, como soar a em um determinado ponto de uma sala um determinado conteúdo sonoro, como um trecho musical, um discurso etc. Para se proceder à geração de aurilização em salas, é necessário, em primeiro lugar, dispor de um simulador de acústica de salas. Uma das saídas de um simulador são as respostas impulsivas, em determinados pontos selecionados da sala. Se o simulador possui um modelo – ou um banco de dados – para as funções de transferência associadas à cabeça humana (HRTFs – da sigla em inglês, *Head Related Transfer Functions*), ele pode fornecer também, como saída, as respostas impulsivas biauriculares da sala para determinadas posições (BRIRs – da sigla em inglês, *Binaural Room Impulse Responses*).

Este artigo tem o propósito de apresentar e discutir alguns dos resultados monoauriculares obtidos pelo código RAIOS 7 na primeira intercomparação internacional de programas de simulação de acústica de salas com aurilização, o RR4, que teve início em meados de 2016 e teve como prazo final 31 de dezembro de 2017.

Embora o RR4 tenha se caracterizado por se constituir em uma intercomparação *com* aurilização, uma das publicações mais detalhadas sobre os resultados obtidos pelos programas participantes, referem-se aos parâmetros de qualidade acústica monoauriculares [7]. Um segundo artigo sobre o RR4, este lidando com as respostas impulsivas biauriculares [8], analisa os testes perceptuais das respostas impulsivas biauriculares, baseados entre outros, no SAQI [9].

2. DESCRIÇÃO GERAL DO ROUND ROBIN 4

A seguir, uma descrição sucinta dos nove cenários básicos propostos para serem simulados no RR4. A Figura 1 ilustra o Cenário 1, constituído por uma câmara semianecoica que possui uma grande superfície difusora em MDF apoiada sobre o seu piso refletor. A Figura 2 ilustra o Cenário 2, uma câmara anecoica com um refletor simples.



Figura 1: Cenário 1, câmara semianecoica com piso difusor (extraída de [10]).

A Figura 3 ilustra o Cenário 3, também uma câmara anecoica, mas agora com duas placas refletoras paralelas e, entre elas, a fonte sonora e o receptor, uma cabeça artificial.

A Figura 4 apresenta o Cenário 4, a mesma câmara anecoica, com um único arranjo de nove refletores retangulares. Observe-se, nas Figuras 1, 3 e 4 a presença de fontes sonoras direcionais.

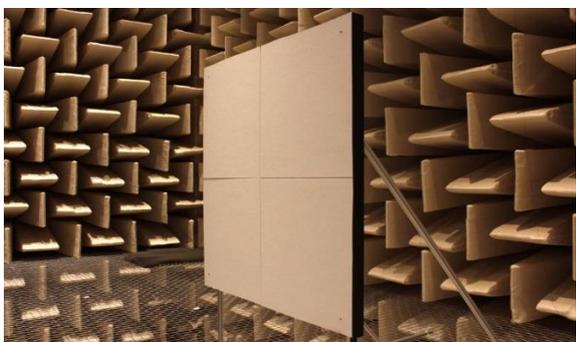


Figura 2: Cenário 2, câmara anecoica com refletor retangular em seu interior (extraída de [10]).



Figura 3: Cenário 3, câmara anecoica com duas placas refletoras (extraída de [10]).



Figura 4: Cenário 4, também anecoico com um arranjo de refletores retangulares (extraída de [10]).

A Figura 5 ilustra o Cenário 5, que se constitui de uma divisória vertical apoiada sobre o piso de uma câmara semianecoica. A fonte sonora fica de um lado da divisória e o receptor do outro. O objetivo dessa configuração é avaliar a simulação de difração.

A Figura 6 mostra uma parte do Cenário 8, que se constitui de duas salas acopladas com uma porta entreaberta entre elas.



Figura 5: Cenário 5, câmara semianecoica com divisória apoiada no piso para simular difração (extraída de [10]).



Figura 6: Cenário 8, câmara reverberante e sala contígua, com porta entreaberta. Vê-se, a cabeça artificial do manequim FABIAN (extraída de [10]).

Os Cenários 6 e 7, embora façam parte do banco de dados GRAS (*Ground truth for Room Acoustics Simulation*) [10], não foram incluídos no RR4.

A Figura 7 ilustra uma sala simples, utilizada como Cenário 9, uma sala de seminários na universidade de Aachen e adotada como “sala pequena” (145 m^3) no RR4.



Figura 7: Cenário 9, uma sala de pequenas dimensões (extraída de [10]).

A Figura 8 exibe o Cenário 10, uma sala de geometria medianamente complexa, como pode ser visto na Figura 9, que mostra sua representação no software de desenho 3-D *SketchUp*. A sala pertence ao conjunto do *Konzerthaus*, em Berlim, e foi tomada como “sala média” (3.320 m^3) no RR4. Essa sala é o objeto de estudo aqui apresentado.

Finalmente, a Figura 10 apresenta o Cenário 11, considerada a “sala grande” (8.650 m^3) do RR4, que se constitui de um grande auditório universitário, na universidade de Berlim.



Figura 8: Cenário 10, sala média do *Konzerthaus*, em Berlim (extraída de [10]).

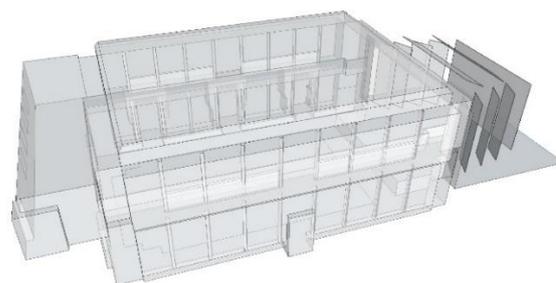


Figura 9: Cenário 10, sala média, em sua perspectiva no software *SketchUp*.



Figura 10: Cenário 11, a sala grande do RR4 (extraída de [10]).

Em todos os cenários citados, um número relativamente grande de posições para as fontes sonoras de três tipos e de receptores (ora microfones, ora cabeças artificiais) foi fornecido. Esses dados fazem parte da publicação [10] que constitui uma ampla base de dados para o desenvolvimento de simuladores de acústica de salas, denominado GRAS (sigla em inglês para *Ground truth for Room Acoustical Simulation*). A Tabela 1 apresenta o número de fontes e receptores em cada uma das salas, bem como outros dados. Cumpre notar ainda que, em cada um dos cenários, são solicitadas simulações em distintas configurações geométricas,

resultando, de fato, em 25 cenários diferentes no total.

Tabela 1: Os diversos cenários e suas características espaciais, de fontes e receptores e número de respostas impulsivas monoauriculares (RIRs) e binauriculares (BRIRs) requeridas.

Cenário	Volume (m ³)	Fontes	Receptores	Número de RIRs requeridas	Número de BRIRs requeridas
1	296	3	4	29	135*
2	1070	6	5	18	0
3	1070	1	1	1	45*
4	1070	3	3	18	0
5	296	4	4	16	45*
8	–	2	2	40	90*
9	145	5	5	49	225*
10	3320	5	5	70	225*
11	8650	5	6	50	225*

O alto número de BRIRs, indicados com asterisco na Tabela 1, se deve à possibilidade de rotação da cabeça artificial com respeito ao torso, no eixo vertical, que pode assumir 45 posições angulares distintas. Para cada um desses ângulos, é fornecido um banco de dados de HRIRs, com 64.442 direções, para cada ouvido. Por exemplo, no Cenário 9, são cinco posições de cabeça artificial com 45 posições angulares cada, resultando em $5 \times 45 = 225$ BRIRs. No total, foram solicitadas simulações de 291 RIRs e 990 BRIRs. Possivelmente devido a essa alta exigência computacional, somente sete times se dispuseram a participar do RR4 e, mesmo assim, nem todos rodaram todas as simulações pedidas.

3. CONFIGURAÇÕES DO CENÁRIO 10

De toda essa massa de dados, este trabalho visa apresentar e discutir os resultados obtidos pelo código computacional RAIOS 7 para as respostas impulsivas monoauriculares para cinco pares fonte-microfone. Note-se que foi publicado recentemente uma parte dos resultados do RR4 em um artigo suplementar a [7] com 96 páginas.

A sala do Cenário 10, denominada *Chamber Music Hall*, é mostrada na Figura 11, tal como vista na janela *Edit and View* do código computacional RAIOS 7 [11], com suas duas fontes (icosaedros vermelhos) e cinco

receptores (poliedros verdes de 32 faces) devidamente localizados.

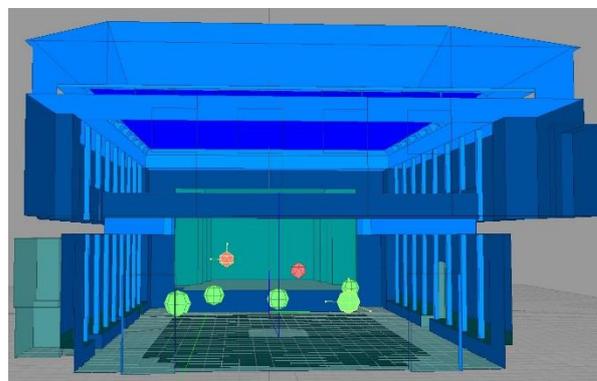


Figura 11: Cenário 10 do RR4 na configuração para o cálculo das RIRs para 10 pares fonte-receptor localizados em seu interior. Visualizado no código RAIOS 7.

Para a sala da Figura 11 – bem como para todos os outros cenários – foram fornecidos pela equipe organizadora do RR4 a geometria da sala, em arquivo *SketchUp*, os coeficientes de absorção e de espalhamento por bandas de oitava de todas as superfícies internas da sala, as coordenadas cartesianas do centro das fontes sonoras e dos receptores e os bancos de dados de direcionalidade das fontes sonoras utilizadas (em azimute e elevação). Também foram fornecidos os bancos de dados das HRIRs da cabeça artificial utilizada para as medições binauriculares. Esse banco de dados, com 64.442 direções, foi fornecido para cada uma das 45 posições angulares de rotação vertical da cabeça com respeito ao torso, uma vez que as funções de transferência da cabeça se alteram com a rotação relativa.

4. ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA RAIOS 7

O código computacional RAIOS 7 calcula as respostas impulsivas (especulares, difusas e híbridas) da sala para os pares fonte-receptor selecionados, as curvas de decaimento e todos os parâmetros mais usuais de qualidade acústica — segundo a norma ISO 3382 [12] — para cada par fonte-receptor no interior de um recinto de geometria arbitrária, em valores globais e por bandas de oitava, entre 63 Hz e

16 kHz. O *software* fornece, ainda, as respostas impulsivas biauriculares para pontos escolhidos no ambiente e, uma vez selecionado um sinal anecoico, gera a auralização da sala nesses pontos. Aplica-se a auditórios, salas de concerto ou ópera, teatros, salas de aula e variados outros ambientes públicos, tais como aeroportos, estações, galpões industriais e toda uma vasta gama de ambientes. Calcula, ainda, os níveis de pressão sonora em regime permanente, global e por bandas de oitava, linear e com curvas de ponderação A B C e D.

O código computacional RAIOS 7 possui uma interface gráfica amigável, baseada em *OpenGL*, que facilita grandemente a visualização da sala, bem como sua própria edição, ou seja, sua construção ou modificação. Além disso, possui capacidade de importar arquivos gráficos com extensão *.dxf (*drawing exchange format*), podendo se comunicar com facilidade com programas de CAD (*Computer Aided Design*), que utilizam esse formato para intercâmbio de dados. Projetos de arquitetura salvos em programas de CAD 3D, por exemplo, podem ser importados pelo programa RAIOS 7, desde que atendidos alguns critérios básicos em sua construção.

Além da geometria arbitrária do recinto, o programa RAIOS 7 permite a modelagem de um número arbitrário de fontes sonoras com potência, densidade espectral, posição, orientação, direcionalidade e número de raios emitidos definidos pelo usuário. Para ambientes industriais e urbanos, pode gerar linhas de fontes sonoras distribuídas (fontes sonoras lineares).

Um sistema de camadas (*Layers*) permite a associação de cada superfície a um material,

contendo uma tabela de coeficientes de absorção e de espalhamento, por bandas de oitava entre 63 Hz e 16 kHz. O programa incorpora uma ampla tabela de materiais, (mais de mil) para maior comodidade do usuário. Contudo, este sempre pode introduzir com facilidade novos materiais com suas características acústicas de absorção e espalhamento, caso a tabela de materiais não o atenda.

O usuário também escolhe receptores — que podem ser considerados como microfones, se o que se deseja são respostas impulsivas monoauriculares, ou cabeças artificiais, se as respostas impulsivas biauriculares são desejadas. Diversas características dos receptores, como posição, orientação, diâmetro visual etc. podem ser selecionados pelo usuário. Há, ainda, a possibilidade de girar a cabeça em relação ao torso, em torno do eixo vertical, para 45 posições angulares distintas. O programa RAIOS 7 incorpora as funções de transferência da cabeça para cada uma dessas orientações. A Figura 12 mostra uma resposta impulsiva não filtrada calculada para o Cenário 10 do RR4.

A Figura 14 apresenta a tabela de parâmetros de qualidade acústica [12] para o par fonte-microfone LS1-MP1. Os parâmetros, dados em valores globais e por bandas de oitava entre 63 Hz e 16 kHz são: T_{20} , T_{30} , T_{40} , EDT, D_{50} , D_{80} , C_{50} , C_{80} , T_S , G, LG, LF, LFC e ST1.

A Figura 13 ilustra as curvas de decaimento, por bandas de oitava, para o mesmo par fonte-receptor anterior.

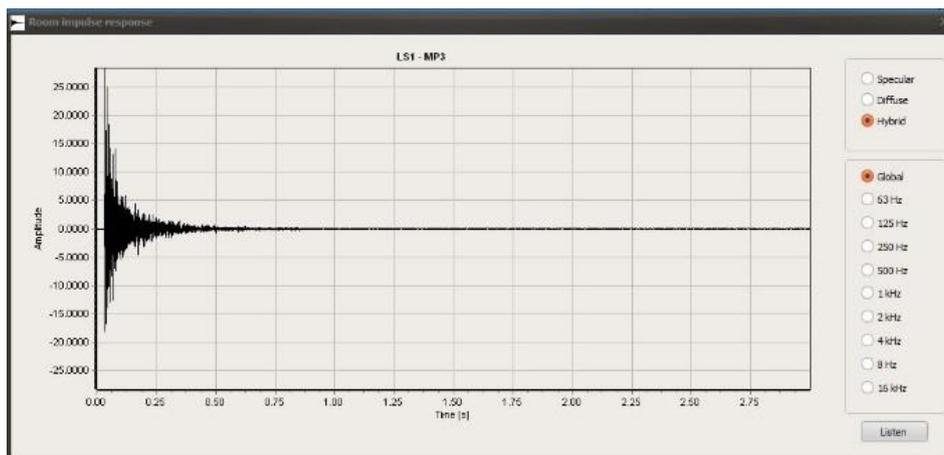


Figura 12: RIR para o par LS1-MP3 no Cenário 10 do RR4.

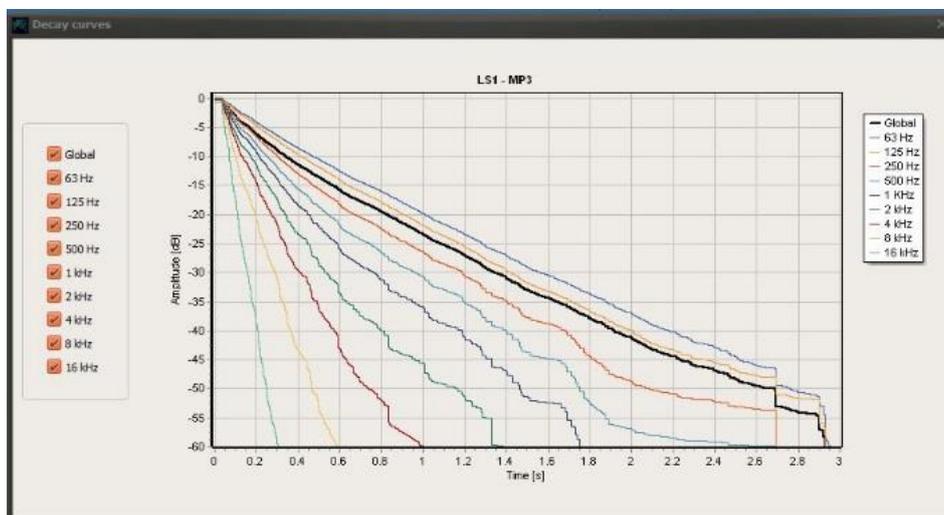


Figura 13: Decaimentos por bandas para o par LS1-MP3, no Cenário 10 do RR4.

Table of acoustic quality parameters

Source: LS1
Receiver: MP1

	Global	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
T20 [s]	2.84	3.16	2.90	2.33	1.81	1.44	1.02	0.76	0.54	0.24
T30 [s]	3.00	3.29	3.02	2.48	2.07	1.66	1.12	0.82	0.53	0.27
T40 [s]	3.21	3.44	3.19	2.63	2.18	1.79	1.29	0.87	0.52	0.27
EDT [s]	2.0	2.7	2.3	1.7	1.4	1.2	0.9	0.6	0.4	0.2
D50 [%]	38.2	23.4	26.3	37.6	44.5	50.3	59.0	64.3	75.8	91.4
D80 [%]	54.1	36.7	40.8	54.8	62.7	69.1	77.9	83.2	91.5	98.7
C50 [dB]	-2.1	-5.2	-4.5	-2.2	-1.0	0.0	1.6	2.6	5.0	10.3
C80 [dB]	0.7	-2.4	-1.6	0.8	2.3	3.5	5.5	6.9	10.3	18.7
TS [ms]	131.7	193.6	169.8	118.9	95.9	79.6	61.2	50.7	37.3	23.6
G [dB]	20.8	14.9	14.3	12.5	11.4	10.6	9.2	8.4	5.9	0.7
LG [dB]	12.1	7.5	6.7	3.8	2.0	0.2	-2.7	-4.8	-10.4	-23.8
LF [%]	25.2	25.2	24.8	25.9	26.0	25.8	24.9	25.1	24.3	21.2
LFC [%]	40.4	40.4	40.0	41.3	41.4	41.0	39.8	40.0	39.3	36.0
ST1 [dB]	7.6	8.1	8.2	8.5	8.4	8.0	7.2	6.5	5.1	1.9

Figura 14: Parâmetros de qualidade acústica por bandas de oitava para o par LS1-MP1 no Cenário 10 do RR4.

No cálculo das respostas impulsivas biauriculares, o código RAIOS 7 utiliza uma técnica própria, modelando as HRIRs filtradas que atingem cada receptor via redes neurais artificiais do tipo *radial basis functions* [13–15]. Com essa técnica, o cálculo das BRIRs é executado em cerca de 1/10 do tempo despendido por programas de simulação que utilizam o método tradicional das convoluções. Uma vez feita a simulação da sala, ou seja, calculados todos os raios acústicos que chegam a cada receptor selecionado, podem ser calculadas as respostas impulsivas biauriculares, acessando-se o menu *Binaural*, mostrado na Figura 15, na opção *Generating BRIR*, que abre a janela indicada na Figura 16.

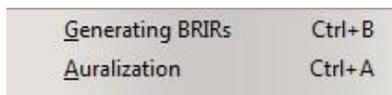


Figura 15: O menu *Binaural* e suas opções.

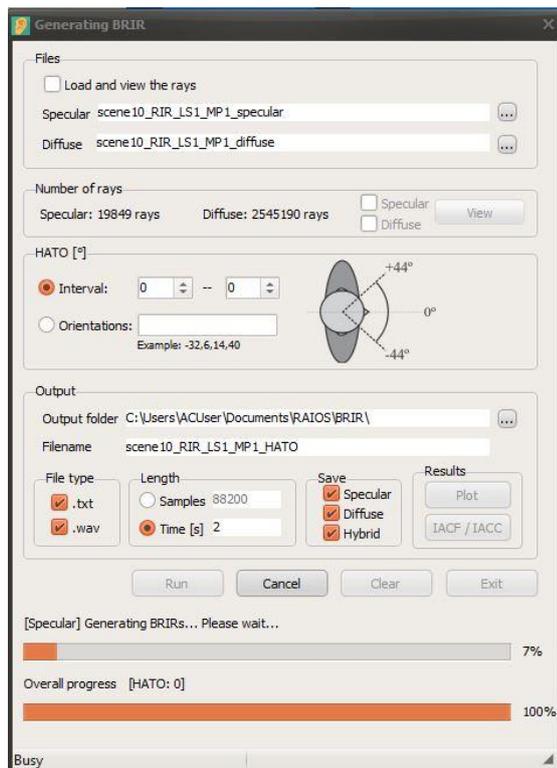


Figura 16: Janela *Generating BRIR*, indicando que está sendo calculada a BRIR para o Cenário 10, par LS1-MP1, com a cabeça apontada para frente.

Uma vez calculada a resposta impulsiva biauricular para um dado par fonte-receptor, a sala em questão pode ser aurilizada para aquela

posição. No mesmo menu *Binaural*, agora na opção *Auralization*, acessa-se a janela mostrada na Figura 17, onde são vistas as três abas: *BRIR* (onde se vê plotado o sinal da BRIR, calculado anteriormente); *Anechoic sound* (onde se vê plotado o sinal anecoico selecionado, uma sequência de palmas, nesse caso); e *Auralization* (onde se observa o gráfico do sinal aurilizado, nos dois ouvidos).

Observa-se que as sete palmas (anecoicas) se reproduzem, a intervalos regulares, porém com a reverberação característica da sala, indicada por sua resposta impulsiva biauricular.

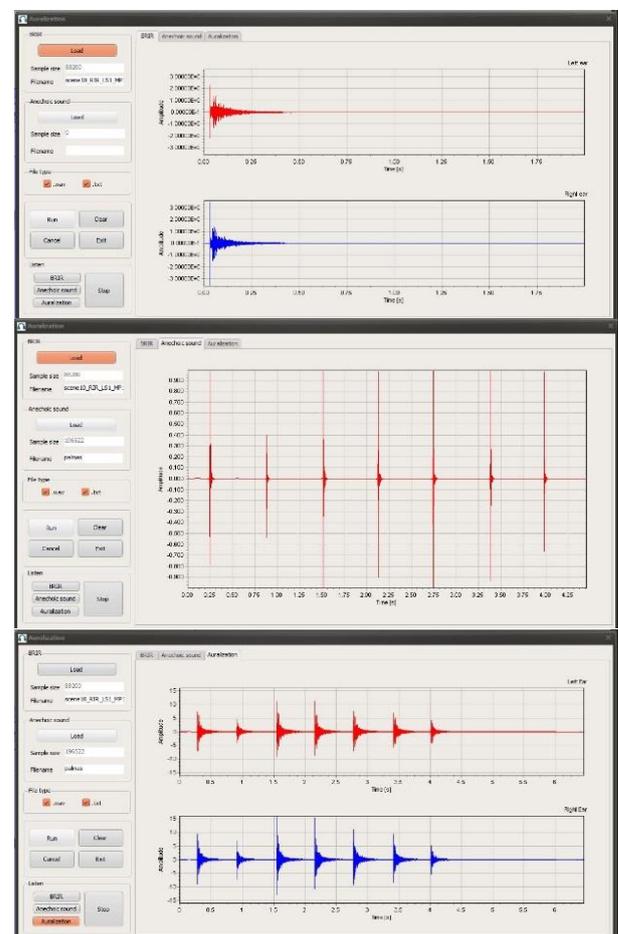


Figura 17: Janela *Auralization*, mostrando os gráficos de uma BRIR (acima), um sinal anecoico de palmas (no meio) e o resultado da convolução, no sinal aurilizado (abaixo).

5 RESULTADOS

Apresentam-se, a seguir, os resultados comparativos entre os parâmetros de qualidade acústica – PQAs calculados pelo código

RAIOS 7 e aqueles calculados a partir das respostas impulsivas medidas pela equipe do RR4, para cinco pares fonte (LS) – microfone (MP), no Cenário 10.

Os parâmetros aqui abordados são os mesmos apresentados em [7], apresentando os resultados obtidos pelos programas participantes do Round Robin 4.

Os pares fonte-microfone aqui selecionados são os LS1-MP1, LS1-MP2, LS1-MP3, LS1-MP4 e LS1-MP5. Para esses cinco pares, apresenta-se, em bandas de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, o tempo de reverberação (T_{20}), o tempo de decaimento inicial (EDT), o fator de clareza para música (C_{80}) e a definição para a fala (D_{50}).

A Figura 18 mostra os resultados comparativos para T_{20} no Cenário 10, para os cinco pares fonte-receptor, indicando os valores calculados pelo código computacional RAIOS 7 (linha azul) e os valores medidos (linha preta).

As Figuras 19 a 21 mostram os resultados comparativos para, respectivamente, EDT, C_{80} e D_{50} , Cenário 10, para os cinco pares fonte-receptor, indicando os valores calculados pelo código computacional RAIOS 7 (linha azul) e os valores medidos (linha preta).

Como se pode observar, em todos os quatro PQAs apresentados nas Figuras 18 a 21 e para todos os cinco pares fonte-microfone, há desvios entre os resultados simulados e medidos, notadamente em baixa frequência. Os desvios se devem, em parte, à incerteza de medição dos coeficientes de absorção e espalhamento das superfícies da sala e, por outra, aos erros intrínsecos aos modelos de acústica geométrica utilizados na simulação, que não contemplam a baixa frequência [16].

A seguir, é feita a comparação entre os desvios médios, relativos aos dados de medição, dos valores simulados pelo código RAIOS 7 e os desvios médios dos demais programas, participantes do RR4.

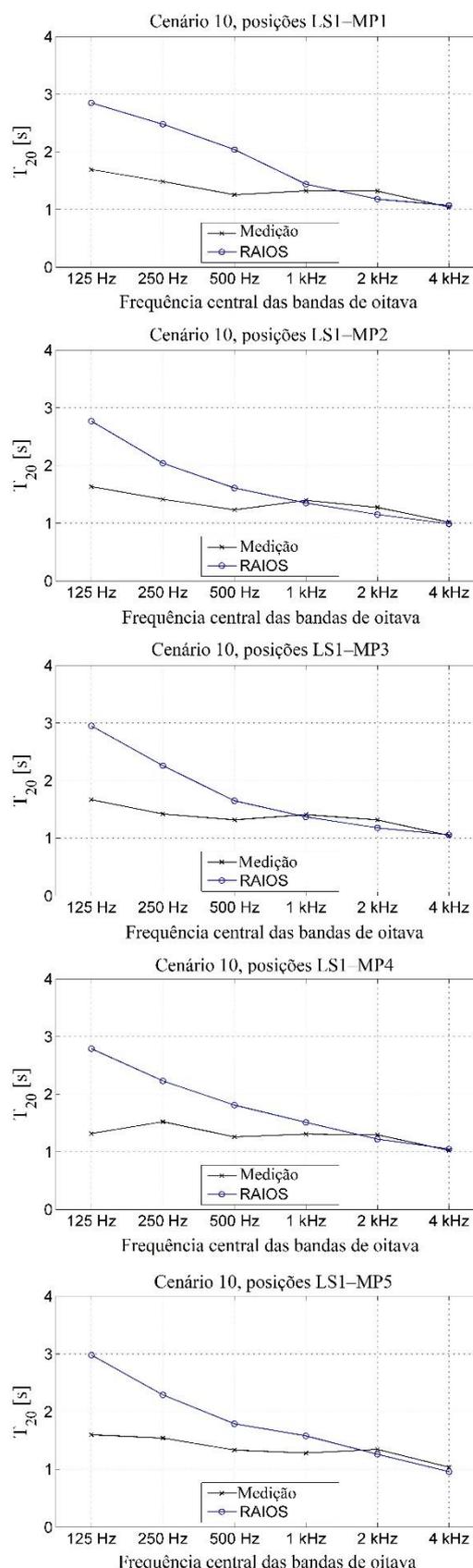


Figura 18: T_{20} por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

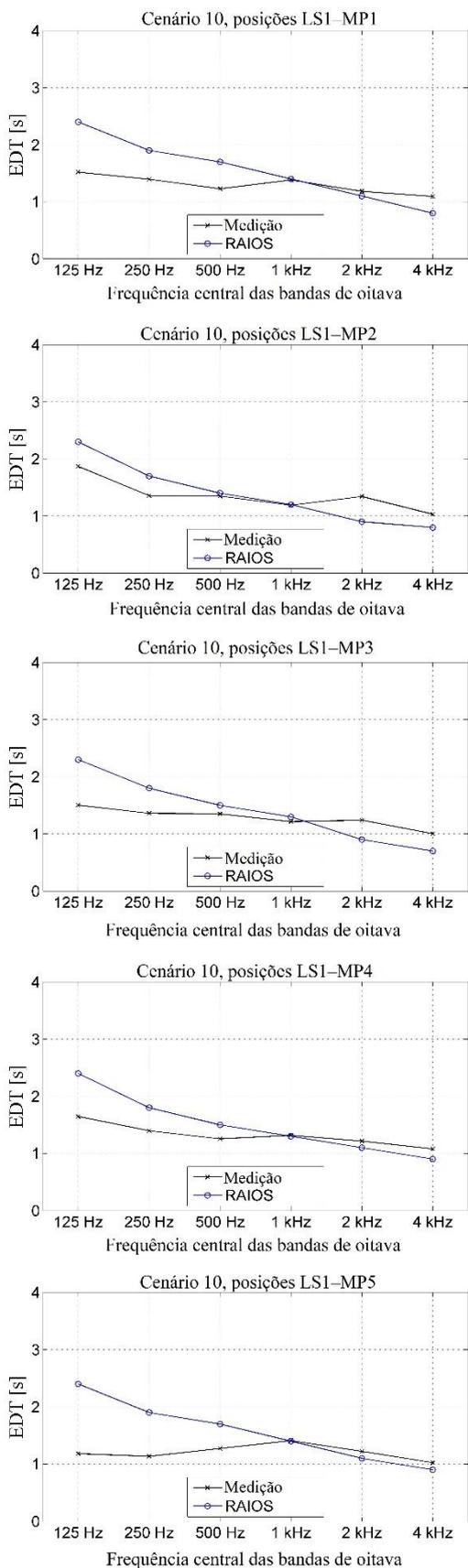


Figura 19: EDT por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

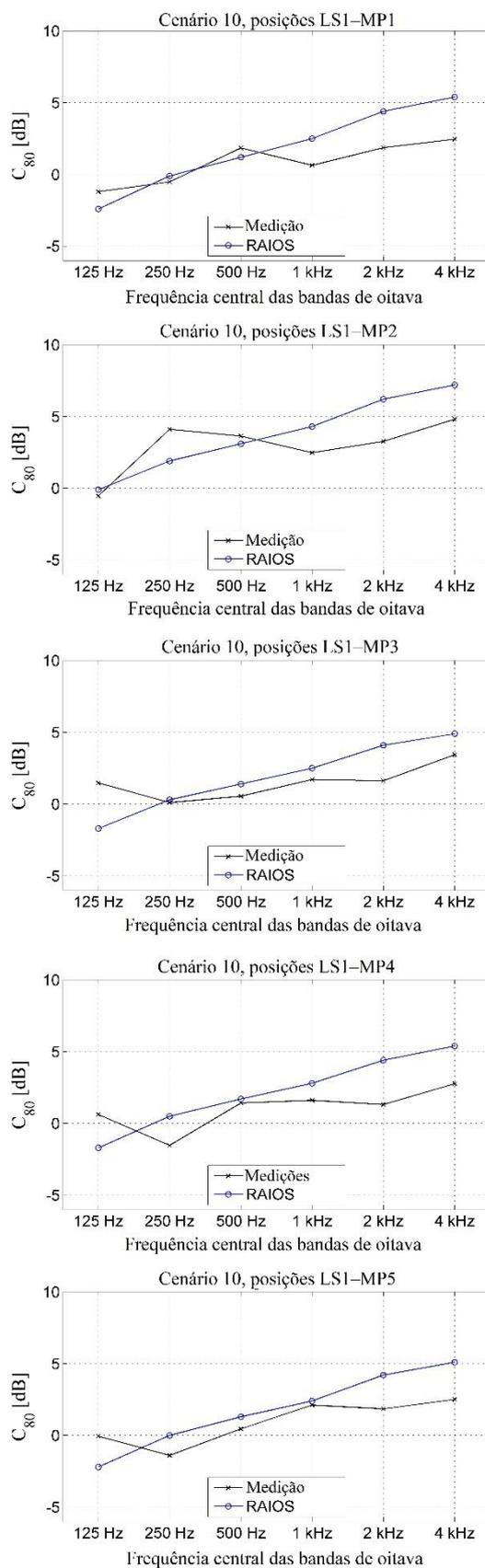


Figura 20: C_{80} por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

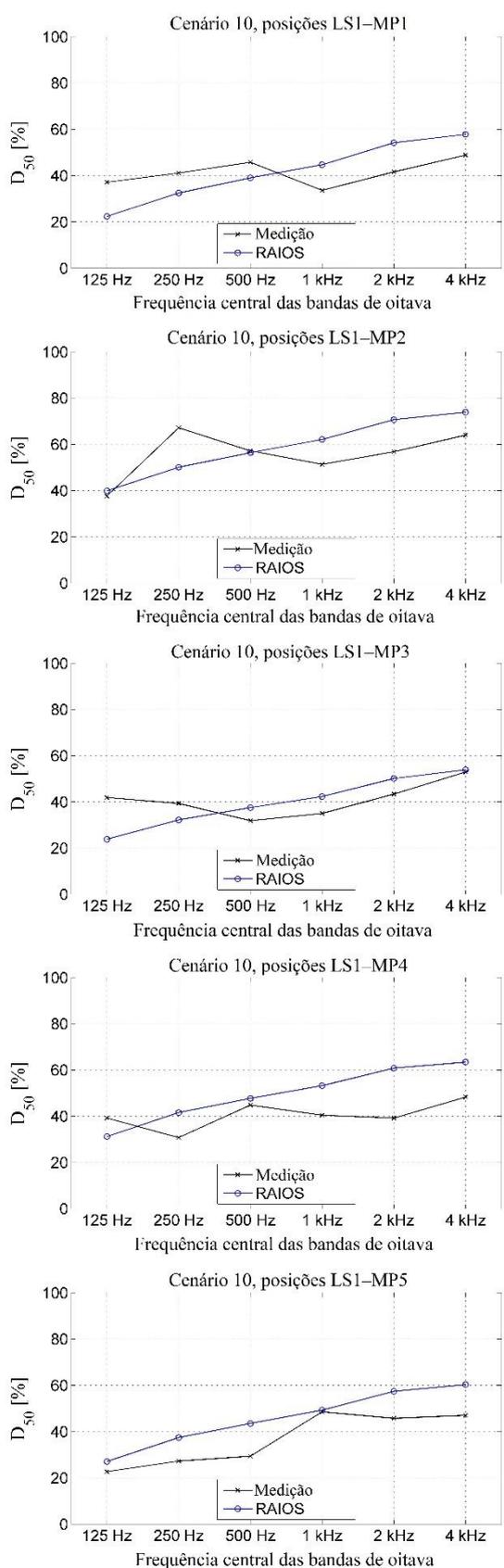


Figura 21: D_{50} por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

6. ANÁLISE DOS DESVIOS

Os resultados apresentados a seguir são todos extraídos da publicação [7] que retrata os resultados de alguns coeficientes de qualidade acústica obtidos por todos os participantes do RR4 para cada um dos cenários simulados. O artigo, como mencionado, possui um arquivo suplementar de 96 páginas com dados e curvas.

Apresentam-se, a seguir, curvas comparativas para T_{20} , EDT, C_{80} e D_{50} , em função da frequência, para uma dada posição fonte-microfone, no Cenário 10. Note que há seis programas participantes, identificados, pelos autores, como indicado na Figura 22.



Figura 22: Identificação dos seis programas que simularam a Sala 10 no RR4 (adaptado de [7]).

As Figuras 23 a 26 apresentam os resultados obtidos por cada um dos seis programas, comparados com os resultados de medição, para o Cenário 10, o par fonte-microfone LS1-MP1 e, respectivamente, os PQAs: T_{20} , EDT, C_{80} e D_{50} , em função da frequência.

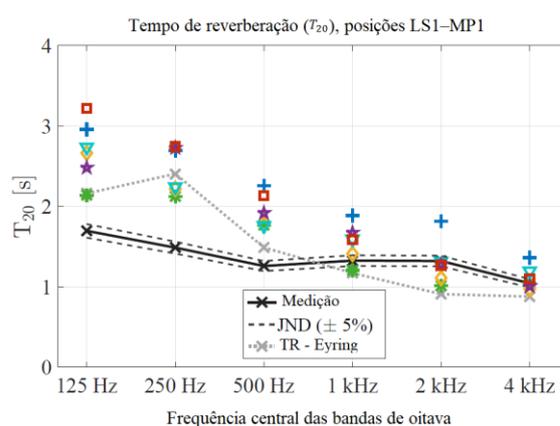


Figura 23: T_{20} para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

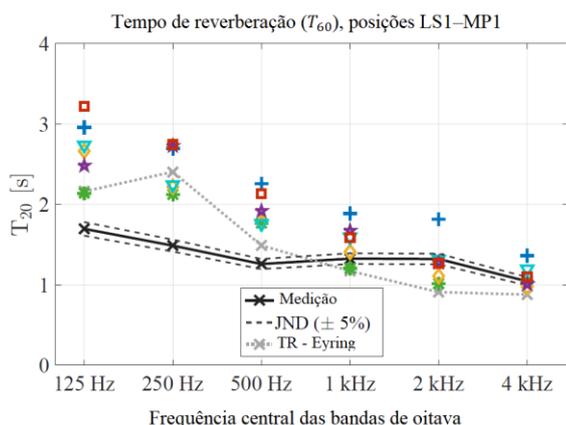


Figura 24: EDT para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

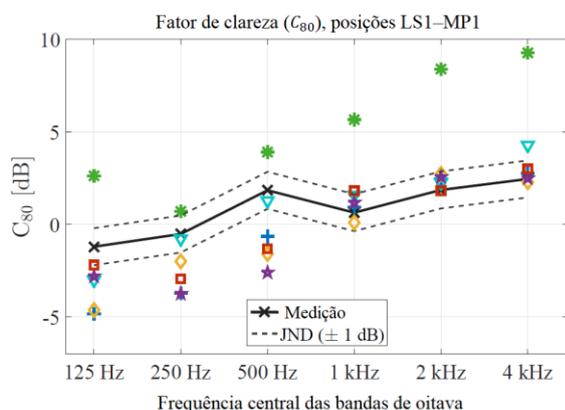


Figura 25: C_{80} para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

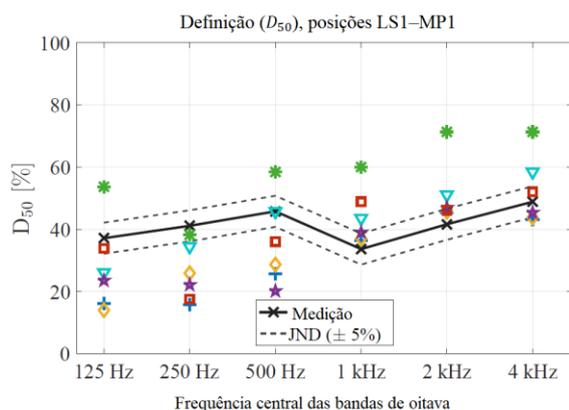


Figura 26: D_{50} para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

Como se pode observar inspecionando-se as Figuras 23 a 26 e comparando-as com o primeiro gráfico das Figuras 18 a 21, que apresentam os resultados dos PQAs em análise para o par LS1-MP1, evidencia-se que os desvios do código computacional RAIOS 7 é, em média, inferior aos desvios obtidos por alguns dos demais programas participantes.

A Tabela 2 apresenta os valores médios, entre as seis bandas de frequência, dos desvios absolutos dos seis programas, comparados aos desvios absolutos dos valores calculados pelo código RAIOS 7 (R7), para os quatro parâmetros de qualidade acústica. Observe-se que os desvios foram estimados em valor absoluto, ou seja, indiferentemente se o foram para mais ou para menos em relação ao valor medido. Desvios maiores do que os do R7 estão indicados em vermelho; desvios menores que o do R7 estão indicados em azul.

Tabela 2: Média dos desvios para as seis bandas de frequência dos PQA calculados por sete programas de simulação no RR4, Cenário 10, LS1-MP1.

	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)	1,80	4,30	1,71	1,06	1,80	1,54	1,53
D_{50} (%)	13,3	18,3	12,0	08,2	12,2	10,3	11,2

Dentre os sete programas comparados na Tabela 2, o código RAIOS 7 (R7) ficou em quarto lugar na média dos desvios (MDD) para o parâmetro T_{20} , ou seja, ficou na mediana. Para o parâmetro EDT, o código R7 colocou-se em primeiro lugar (juntamente com o programa C) na MDD. Quanto ao o parâmetro C_{80} , o código R7 classificou-se em segundo lugar na MDD. Finalmente, quanto ao parâmetro D_{50} o código R7 posicionou-se em terceiro lugar na MDD.

6. CONCLUSÕES

Lamentavelmente, o a equipe do LIDAV que rodou as simulações do RR4 só foi informada tardiamente do lançamento do evento. Como já mencionado anteriormente, as exigências do certame foram significativamente altas e a equipe não conseguiu terminar dentro do *deadline* estabelecido (31/12/2018) o conjunto de simulações, não tendo, por essa razão, seus resultados incluídos em [7,8].

Nas conclusões do artigo [7] sobre as respostas impulsivas monoauriculares obtidas no RR4, é dito que: “*Cenas simples revelaram diferenças substanciais entre os participantes e os dados medidos, enfatizando a lacuna dos modelos de acústica geométrica e a importância de técnicas de modelagem adequadas para fonte e receptor.*” (tradução livre destes autores). Em outros termos, identifica-se ainda limitações tanto do modelo da acústica geométrica como nos modelos de fontes e receptores como possíveis fontes de erro no cálculo dos parâmetros de qualidade acústica para os pares fonte-microfone nas salas. Acreditamos, como mencionado anteriormente, que a incerteza na medição dos coeficientes de absorção e espalhamento também pode ser considerado um fator significativo de erro.

Acredita-se que, com o lançamento do GRAS [10], os desenvolvedores de programas de simulação numérica de acústica de salas têm à disposição um número significativo de cenários distintos – com resultados de medição com reduzido grau de incerteza – para continuar a desenvolver seus programas de simulação. A equipe desenvolvedora do código RAIOS 7 aperfeiçoou bastante o código durante o andamento do Round Robin 4, embora não tenha terminado as simulações dentro do *deadline*, como mencionado.

Quanto aos desvios encontrados entre os resultados medidos e os resultados simulados pelo código RAIOS 7 e os demais programas participantes do RR4, uma análise mais detalhada, incluindo outros cenários, será

objeto de publicações futuras. Todavia, os resultados aqui apresentados para o Cenário 10 demonstra que o código, ao menos no que tange às respostas impulsivas monoauriculares, demonstrou um bom comportamento, face aos demais programas.

REFERÊNCIAS

1. VORLÄNDER, M. International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Proc. 15th International Congress on Acoustics*, Trondheim, 1995.
2. BORK, I. A comparison of room simulation software – the 2nd Round Robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acustica*, 84, 943–952, 2000.
3. BORK I. Report on the 3rd Round Robin in room acoustical computer simulation, Part I: Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, 91, 4, 740–752, 2005a.
4. TENENBAUM, R.A.; CAMILO, T.S.; TORRES, J.C.B.; GERGES, S.N.Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 1 – Theoretical and numerical aspects. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. and Eng.*, 29(2):211–221, 2007a.
5. TENENBAUM, R.A., CAMILO, T.S., TORRES, J.C.B.; STUTZ, L.T. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 – Validation of the computational code RAIOS 3. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 29(2):222–231, 2007b.
6. VORLÄNDER, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
7. BRINKMANN, F.; ASPÖCK, L.; ACKERMANN, D.; LEPA, S.; VORLÄNDER, M.; WIENZIERL, S. A round robin on room acoustical simulation and auralization. *J. Acoust. Soc. Am.*, 145, 2746, 2019.
8. BRINKMANN, F.; ACKERMANN, D.; ASPÖCK, L.; WEINZIERL, S. First international round robin on room auralization: Results of the perceptual evaluation, *J. Acoust. Soc. Am.*, 141(5).
9. LINDAU, A.; ERBES, V.; LEPA, S.; MAEMPEL, H.J.; BRINKMAN, F.; WEINZIERL, S. A Spatial Audio Quality Inventory (SAQI). *Acta Acustica united with Acustica*, 100:984–994, 2014.
10. ASPÖCK, L.; BRINKMANN, F.; ACKERMAN, D.; WEINZIERL, S.; VORLÄNDER, M. GRAS – Ground Truth for Room Acoustical Simulation, <https://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6726>, 2018.
11. TENENBAUM, R.A. Manual de Utilização – RAIOS 7, Versão 7.10. Nova Friburgo, disponível em <https://ratenenbaum.wixsite.com/acustica>, 2018.

12. ISO 3382-1, Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces (International Organization for Standards), Geneva, Switzerland, 2009.
13. TENENBAUM, R.A.; TAMINATO, F.O.; MELO, V.S.G.; TORRES, J.C.B. Auralization generated by modeling HRIRs with artificial neural networks and its validation using articulation tests. *Applied Acoustics*, 130, pp. 260–269, 2018.
14. TAMINATO, F.O. *Redes neurais artificiais aplicadas à modelagem de respostas impulsivas associadas à cabeça humana para gerar aurilização*. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2018.
15. TAMINATO, F.O.; TENENBAUM, R.A.; MELO, V.S.G. Técnica rápida para geração de aurilizações utilizando redes neurais artificiais. *Acústica e Vibrações*, 50:??, 2018.
16. SAVIOJA, L.; SVENSSON, U.P. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(2):708–730, 2015.