

**William D'Andrea
Fonseca** 

*Universidade Federal de
Santa Maria - UFSM*
Av. Roraima nº 1000,
Cidade Universitária
Santa Maria - RS

{will.fonseca}
@eac.ufsm.br

Márcio Avelar 

*Universidade Tecnológica
Fed. do Paraná - UTFPR*
Av. Sete de Setembro, 3165
Rebouças, Curitiba - PR

{marciogomes}
@utfpr.edu.br

**Roberto A.
Tenenbaum** 

*Universidade Federal de
Santa Maria - UFSM*
Av. Roraima nº 1000,
Cidade Universitária
Santa Maria - RS

{roberton.tenenbaum}
@eac.ufsm.br

Julio Torres 

*Universidade Federal do
Rio de Janeiro - UFRJ*
Av. Pedro Calmon, 550
Cidade Universitária
Rio de Janeiro - RJ

{julio}
@poli.ufrj.br

Eric Brandão 

*Universidade Federal de
Santa Maria - UFSM*
Av. Roraima nº 1000,
Cidade Universitária
Santa Maria - RS

{eric.brandao}
@eac.ufsm.br

Simulações de Acústica de Salas desenvolvidas nas universidades do Brasil

Brasil conta com poderosas ferramentas de simulação que nasceram dentro de universidades

Resumo: Simulação em acústica de salas tem um importante papel para pesquisadores e consultores do ramo. No Brasil, existem diversas iniciativas de *software* para essa finalidade. Logo, nesta seção, trazemos uma pequena revisão sobre o assunto, além dos *software* que nasceram nas universidades brasileiras, frutos de pesquisa e desenvolvimento. Embora apresentando etapas distintas de maturidade, eles têm funcionalidades sofisticadas e profissionais, são eles RAIOS, BRASS e Trem.

Room Acoustics simulations developed at Brazilian universities

Abstract: Simulation in room acoustics has an important role for researchers and consultants in the field. In Brazil, there are several software initiatives for this purpose. Thus, in this section, we bring a short review of the topic as well as the software born in Brazilian universities, the fruits of research and development. Although presenting different stages of maturity, they have sophisticated and professional features; they are RAIOS, BRASS, and Trem.

1. Introdução

O projeto acústico de ambientes fechados, em especial a partir de meados do século XX, vem sendo frequentemente feito com o auxílio de alguma forma de simulação^a, em especial quando a finalidade é proporcionar um espaço onde a informação sonora é parte essencial do contexto, senão a protagonista da cena, veja o exemplo de *traçado de raios* da Figura 1.

No caso das salas de concerto, tomando o exemplo mais clássico, percebemos que músicas de diferentes épocas podem exigir características específicas. Atualmente salas de cinema que recebem sistemas de som de empresas como Dolby, THX ou DTS, por exemplo, exigem projetos mais cuidadosos. Assim como as salas de aula, visto que uma

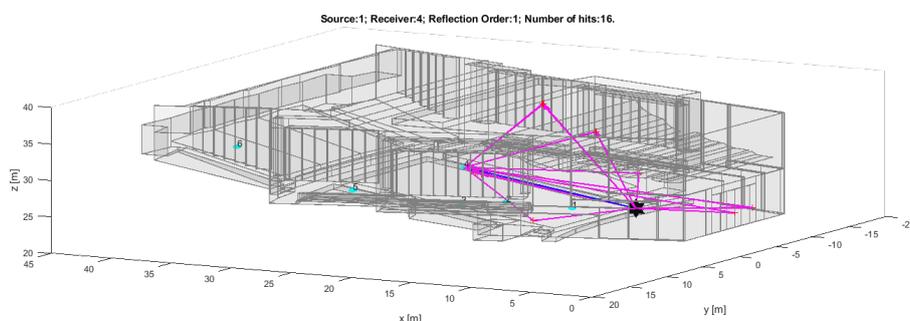


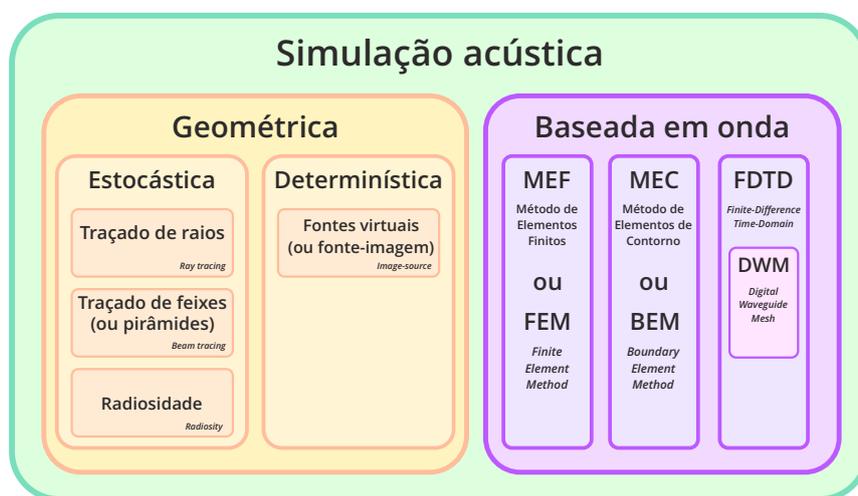
Figura 1: Exemplo de *traçado de raios* do *software* Trem (Seção 4).

^aAs simulações físicas foram as primeiras a serem realizadas, através de maquetes. E a ideia de auralização já era propagada naquela época, como descrito por Spandöck, em 1934 [1].

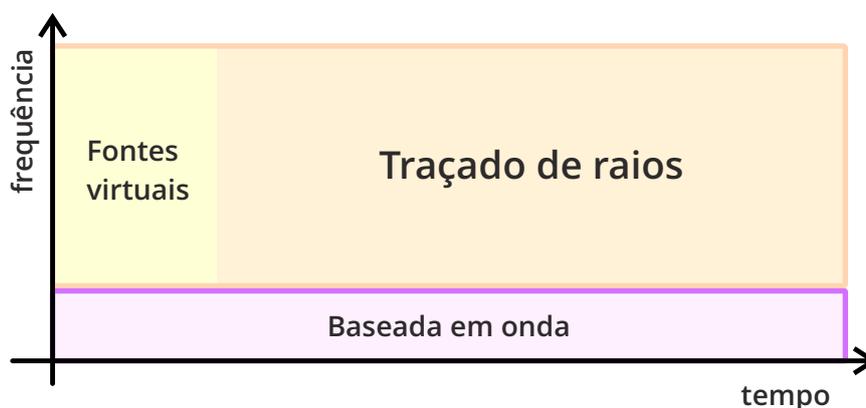
quantidade relevante de pesquisas identificou a falta de adequação para a inteligibilidade da fala em várias situações e que podem depender de ajustes mais finos em relação à absorção sonora.

Já há alguns anos os modelos computacionais são mais utilizados, não apenas pela facilidade e possibilidade de realizar análises mais amplas e minuciosas, mas também por conta da possibilidade de criar amostras sonoras por meio de técnicas de auralização. Em projetos mais delicados, além dos modelos computacionais, utiliza-se também a técnica mais antiga, construindo-se maquetes.

O trabalho considerado pioneiro no emprego de computadores para simular o comportamento acústico de um ambiente fechado é o de Krokstadt, Strom e Sorsdal [2], que reportaram a implementação do método do *traçado de raios* em 1968 (também utilizado para simular iluminação e propagação de ondas eletromagnéticas). Esse método é classificado como “geométrico”, adequado para situações nas quais o comprimento de onda sonora é bem menor do que as dimensões da sala (também ditas “acusticamente grandes”). Nos métodos geométricos assume-se, a princípio, que a propagação sonora ocorre no sentido das frentes de onda e que os fenômenos de difração e refração são considerados pouco significativos. Para estimar a frequência a partir da qual essas premissas são válidas, utiliza-se a conhecida “fórmula de Schroeder”. A Figura 2 ilustra essa ideia de forma resumida.



(a) Métodos de simulação de acústica de salas



(b) Métodos ótimos por tempo e frequência

Figura 2: Métodos de simulação de acústica de salas, recomendados para cada caso (extraído de Fonseca [3]).

Após a implementação do método do traçado de raios, Allen e Berkley implementaram o método das fontes virtuais, ainda para salas retangulares [4]. Alguns anos depois, Borish reportou a implementação desse método para salas com geometria arbitrária [5]. Já nessa época havia no horizonte a possibilidade de realizar a auralização a partir de simulações computacionais. Acreditava-se que o método das fontes virtuais (*image-sources*, em inglês) seria mais adequado à auralização do que o do traçado de raios, pois permite uma melhor estimativa da resposta ao impulso. A resposta ao impulso mais detalhada seria importante principalmente em seu trecho inicial. No entanto, o método das fontes virtuais exigia um tempo de computação proibitivo para a maioria das salas. Os motivos para isso eram: o aumento exponencial do número de fontes virtuais a serem encontradas, em função do número de paredes e do tempo de reverberação; e o custo computacional do teste de “visibilidade” dessas imagens.

Para resolver essa questão, Vorländer publicou, em 1989, uma ideia desenvolvida em seu doutorado que evitava o teste de visibilidade em sua forma tradicional [6]. As fontes virtuais “visíveis” a um determinado receptor poderiam ser encontradas facilmente (e mais rapidamente) a partir de uma simulação feita por meio do método do traçado de raios.

Um outro método, também adequado para salas acusticamente grandes, foi adaptado da área de transferência de calor e é conhecido como método da radiosidade. Lewers apresentou seu algoritmo em 1993, combinado com uma variação do método do traçado de raios, chamado de método dos feixes de raios (*beam tracing*) [7].

Muitas variações surgiram a partir dessas e podem ser conferidas no artigo de revisão de Savioja e Svensson, de 2015 [8]. A Figura 2 (a) sintetiza os principais métodos utilizados a partir da geometria, ao lado esquerdo. A separação entre estocásticos e determinísticos é ilustrativa das implementações mais frequentemente reportadas. Seria possível implementar o traçado de raios de forma determinística, por exemplo. No entanto, o mais comum é que haja um sorteio em relação às direções de propagação a partir da fonte sonora ou à direção de uma reflexão.

Encerrando o período de desenvolvimento dos métodos geométricos, observamos que, enquanto a possibilidade de realizar a auralização foi um tema importante na década de 1990, aproximadamente a partir de 2000, os grupos mais avançados começaram a implementar códigos que poderiam ser utilizados em sistemas de realidade virtual, capazes de atualizar a simulação e os resultados audíveis em tempo real.

No Brasil, um dos primeiros trabalhos foi realizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sob a coordenação e orientação do Prof. Roberto Tenenbaum [9]. Esse grupo específico gerou um programa computacional eficiente que usa não apenas o traçado de raios, mas também o método da radiosidade, de forma híbrida, aproveitando as vantagens de cada método. Anos de desenvolvimento geraram, como “*spin-off*”, o programa comercializado com o nome de RAIOS (Seção 2).

Entre 2003 e 2006, um grupo da Universidade Estadual de Campinas implementou o método do traçado de raios, o método das fontes virtuais e um módulo para auralização, em cooperação com o projeto temático AcMus, financiado pela FAPESP e sediado na Escola de Comunicação e Artes da Universidade de São Paulo. O resultado pode ser conferido em um artigo publicado em 2007 [10].

A partir de 2014, o Prof. Júlio Torres, também na UFRJ, implementou métodos geométricos para simulação de salas com o objetivo de testar rotinas e modelos computacionais. Atualmente essa iniciativa é batizada sob o nome BRASS (Seção 3).

Mais recentemente, professores e pesquisadores da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) vêm desenvolvendo o programa de simulação chamado *Trem* (Seção 4), em alusão às origens de seu principal desenvolvedor, Prof. Eric Brandão. Vale observar que, com a recente estadia do Prof.

Tenenbaum na UFSM, esforços se somaram e deram origem ao desenvolvimento de programas de simulação baseados em métodos numéricos adequados também para salas "acusticamente pequenas", ou seja, frequências também abaixo daquela estimada pela formulação de Schroeder [11].

Além desses, outros grupos implementaram métodos para a simulação acústica de salas, como reportado pelo Prof. Aloísio Schmid, da Universidade Federal do Paraná [12] e em dissertações sob a orientação de professores da Universidade Federal de Uberlândia, como aquela de autoria de Henrique Gomes de Moura [13]. Essa última, defendida em 2005, implementou o método das guias de onda, também adequado para salas acusticamente pequenas.

Há, muito provavelmente, implementações que desconhecemos, até o momento da redação deste artigo, e seus autores são convidados a entrar em contato para que possamos divulgá-los. O Quadro 1 mostra uma relação de programas de simulação de diversas origens e baseados em diversos métodos, para que o leitor possa ter uma primeira orientação e, eventualmente experimente programas comerciais, por meio das suas versões demonstrativas, ou use aqueles gentilmente disponibilizados por seus criadores.

Confira a seguir entrevistas com os Professores Roberto Tenenbaum, Eric Brandão e Júlio Torres, nas quais nos dão mais detalhes sobre seus programas e contam sobre as motivações para seus respectivos desenvolvimentos.

Quadro 1: *Software* para simulação de acústica de salas (extraído de Fonseca [3] e citado por Brandão, Morgado e Fonseca [14]).

	Nome	Tipo	Disponibilidade	Link
1	RAIOS	Geométrico + Radiosidade	Comercial	 
2	BRASS	Geométrico	Livre para pesquisa	 
3	Trem	Geométrico	Livre para pesquisa	 
4	Odeon	Geométrico	Comercial	 
5	COMSOL	Geométrico + BEM/FEM	Comercial	 
6	CATT-Acoustic	Geométrico	Comercial	 
7	Olive Tree Lab	Geométrico	Comercial	 
8	EASE	Geométrico	Comercial	 
9	Auratorium	Geométrico	Comercial	 
10	Ramsete	Geométrico	Comercial	 
11	ICARE	Geométrico + Radiosidade	Comercial	 
12	CadnaR	Geometric	Comercial	 
13	SoundPlan (interior)	Geometric	Comercial	 
14	RAVEN	Geométrico	Livre para pesquisa	 
15	RoomWeaver	Guia de onda	Nenhum	 
16	EAR	Geométrico	Livre	 
17	PachydermAcoustic	Geométrico	Livre	 
18	Parallel FDTD	Guia de onda	Livre	 
19	i-Simpa	Geométrico (expandível)	Livre	 
20	Wayverb	Geométrico + Guia de onda	Livre	 
21	Gypsilab	Geométrico + FEM	Livre	 
22	EVERTims	Geométrico	Livre	 
23	Amray	Geométrico	Livre	 

Nota: o termo *auralização* significa *tornar audível*, podemos dizer que é um análogo à *visualização* (tornar visível). Essa palavra é empregada na língua portuguesa ao fazer-se um neologismo da palavra em inglês *auralization* — e ainda não consta no rol de *palavras oficiais* do português. Todavia, o prof. Tenenbaum costuma empregar *aurilização*, seguindo a lógica empregada nas palavras *auricular* (ou *biauricular*). Ainda, há outras propostas como *audibilização*, também empregada pelo prof. Julio Torres, nesse caso, busca-se uma aproximação com o significado de *tornar audível*. Caro leitor, embora não exista ainda uma *versão oficial*, essas três versões costumeiramente são tratadas como sinônimos.

2. RAIOS

O programa computacional de simulação de acústica de salas RAIOS — um acrônimo para *Room Acoustics Integrated and Optimized Software* ou, em tradução livre, programa integrado e otimizado de simulação acústica de salas — é um código computacional desenvolvido no ambiente acadêmico ao longo de várias décadas que evoluiu a ponto de despertar o interesse de diversos agentes na área de acústica no Brasil. O programa foi pensado de forma a tornar sua utilização fácil e prática para o projetista acústico de salas — normalmente um profissional sem conhecimentos de linguagens de programação ou de algoritmos de simulação — com a possibilidade de inserir modificações geométricas e/ou acústicas (materiais) e re-simular a sala quantas vezes necessário com facilidade.

Em sua atual versão, o RAIOS 7 apresenta uma interface gráfica com estrutura lógica bastante intuitiva. Os dados de entrada do programa são, essencialmente: a geometria da sala, que pode ser importada de arquivos .dxf (*Drawing eXchange Format*); informações diversas sobre fontes e receptores, incluindo suas direcionalidades; materiais que compõem as superfícies de contorno da sala, podendo ser atribuídos livremente coeficientes de absorção e espalhamento; e condições atmosféricas. Como saída, o programa fornece: as respostas impulsivas monoauriculares (RIRs) para cada par fonte-receptor; as curvas de decaimento por bandas de oitava entre 63 Hz e 16 kHz; 14 principais parâmetros de qualidade acústica, segundo a norma ISO 3382 [15–17], também filtrados por banda; as respostas impulsivas biauriculares (BRIRs) para cada par fonte-receptor (com a possibilidade de rotação da cabeça em relação ao torso); os principais parâmetros biauriculares da família das IACFs (*Inter-Aural Cross-Correlation Functions*); e gera a *aurilização* na posição dos receptores a partir de um sinal anecoico arbitrário escolhido. Além disso, possui recursos para editar pequenas modificações geométricas na sala e um utilíssimo módulo para editar sinais acústicos.

O programa RAIOS foi testado nas duas últimas intercomparações internacionais de programas de simulação de acústica de salas, conhecidas como *Round-Robins* (RRs): o RR3, que ocorreu em 2001–2002; e o RR4 que foi lançado em 2016. Esses resultados são discutidos adiante. Para informações adicionais, acesse a página do pesquisador em <https://ratenenbaum.wixsite.com/acustica> e/ou a página do representante comercial do programa RAIOS 7, a GROM Acústica & Vibrações, em <https://www.grom.com.br>. Publicações completas sobre o programa podem ser encontradas em <http://lattes.cnpq.br/1161317972489632>.

2.1 Prof. Roberto A. Tenenbaum (pequena biografia)

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1972), especialização em Metodologia do Ensino Superior pela Fundação Getúlio Vargas (1976), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1975) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1987). Foi docente e pesquisador por mais de 30 anos do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da COPPE, na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foi também Professor Associado da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, atuando no Departamento de Engenharia Mecânica e Energia e na Pós-Graduação em Modelagem Computacional do Instituto Politécnico (IPRJ), Campus Regional de Nova Friburgo, RJ, por mais de 12 anos. Atua na área de Dinâmica, Acústica e Vibrações. Tem seis livros publicados na área de Dinâmica, sendo dois no exterior, e dois livros publicados na área de acústica, além de mais de 250 artigos científicos publicados. É membro emérito e fundador da Associação Brasileira de Ciências Mecânicas (ABCM) e membro fundador da Sociedade Brasileira de Acústica (Sobrac), além de membro da Acoustical Society of America (ASA). É bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq desde 1990 e foi Procientista da UERJ entre 2006 e 2018. Foi, por três mandatos, membro da Comissão de Pós-Graduação em Modelagem

Computacional do IPRJ. Foi o criador e coordenador do Laboratório de Instrumentação em Dinâmica, Acústica e Vibrações (LIDAV), também do IPRJ, de 2007 até 2018. Atualmente é Professor Visitante Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Suas principais linhas de pesquisa atuais são: vibroacústica e identificação de fontes sonoras; realidade virtual acústica e modelagem de funções de transferência relativas à cabeça humana; aurilização de salas e realidade virtual acústica; simulação numérica de campo acústico em salas; qualidade acústica de salas de aula; avaliação acústica de salas de concerto; identificação de dano estrutural a partir de ensaios de propagação de ondas acústicas e de vibrações; e problemas inversos em dinâmica, acústica e vibrações.

2.2 Entrevista com o criador do RAIOS

Nesta seção temos uma pequena entrevista com perguntas e respostas com o Professor Roberto A. Tenenbaum.

1. Como foi a motivação para começar o projeto e o nascimento do programa?

No início da década de 1990, os programas de simulação em acústica de salas estavam começando a despontar. Do então Grupo de Acústica e Vibrações atuando no Programa de Engenharia Mecânica da COPPE, UFRJ, o colega Jules Slama e eu tínhamos particular interesse em acústica de salas e surgiu, na ocasião, um estudante de mestrado que se interessou pelo tema e gostava de programação. Daí resultou a primeira versão do programa RAIOS, objeto de uma dissertação de mestrado [9]. Essa primeira versão, ainda bem rudimentar, calculava exclusivamente o campo sonoro em regime permanente em um recinto. Com o meu contínuo interesse em estudar acústica de salas, orientei individualmente outros trabalhos de pesquisa envolvendo simulação. Todavia, somente em 2003, uma excelente dissertação de mestrado resultou na Versão 3 do programa RAIOS [18]. Essa versão já incorporava o método das *matrizes de transição* [19] — também conhecido como *método da radiosidade* — que foi desenvolvido por nós em uma profícua colaboração internacional com pesquisadores do Instituto Superior Técnico de Lisboa [20], visando incorporar o cálculo das reflexões difusas. O programa RAIOS 3 participou do *Round-Robin 3* (RR3) [21, 22] alcançando excelentes resultados comparativos aos demais programas de simulação participantes, como reportado em Tenenbaum et al. [23].

Posteriormente, outros trabalhos de mestrado [24] e doutorado [25–27] deram continuidade ao desenvolvimento do programa RAIOS. A pesquisa concentrou-se, nessa fase, na simulação das respostas impulsivas biauriculares (BRIRs), que trazem desafios bastante interessantes. Ao final de 2018, o desenvolvimento do programa chegou à sua Versão 7, que incorpora uma técnica original de inteligência artificial — única entre os *software* de simulação de acústica de salas de que tenho conhecimento — que modela as HRIRs/HRTFs de modo que as computacionalmente custosas operações de convolução entre as HRIRs e os raios acústicos que atingem o receptor são contornadas [28], resultando em uma redução de tempo de cálculo das BRIRs de cerca de 90%, ou seja, estas são calculadas em cerca de um décimo do tempo despendido no método clássico das convoluções [29]. O programa RAIOS 7 participou ativamente do *Round-Robin 4* (RR4), o primeiro que envolveu respostas impulsivas mono e biauriculares. Os dados de entrada para os simuladores estão disponíveis em Aspöck et al. [30]. O número de salas, configurações destas, fontes sonoras direcionais e receptores dão uma ideia do grande esforço empreendido pelos participantes nas simulações. A principal publicação relativa ao RR4 é [31] e os resultados obtidos pelo programa RAIOS 7 no certame estão reportados em Melo et al. [32] e Carneiro et al. [33].

2. Como foi a decisão sobre os métodos empregados?

De início, a opção pelo método de traçado de raios se apresentou como natural, por sua simplicidade e eficiência. Ao considerar a possibilidade de agregar o método das fontes virtuais, verificou-se que haveria um incremento significativo do custo computacional — e, conseqüentemente, de tempo de cálculo — e a opção de hibridização entre esses dois métodos foi abandonada. Em seguida, convencidos da importância de simular a difusão em salas [34], passou-se a estudar a melhor forma de levar em conta o fenômeno de espalhamento. Chegou-se, então, ao método da radiosidade — basicamente, o mesmo utilizado classicamente em problemas de condução de calor [35] — que foi implementado com sucesso a partir de matrizes de transição, como mencionado. O que se observa é que, efetivamente, as respostas impulsivas obtidas ficam como que mais “preenchidas” dando uma impressão mais realística, principalmente nas aurilizações.

Contudo, ainda restava uma questão importante para ser resolvida. O cálculo das RIRs, utilizando o método híbrido acima descrito, é executado em tempos de cálculo considerados como razoáveis, variando, naturalmente, com a complexidade geométrica da sala. Mas o cálculo das BRIRs — que são obtidas *após* a propagação na sala ter sido simulada, fazendo-se a convolução entre as HRIRs e os raios acústicos que chegam a cada receptor —, mostrou-se bastante demorado, principalmente se há um número significativo de receptores biauriculares na sala. Investigou-se, então, a possibilidade de modelar o banco de dados das HRIRs por meio de inteligência artificial, o que resultou na Versão 7 do programa RAIOS, com a significativa redução do tempo de cálculo das BRIRs, como já mencionado.

3. Em que etapa de evolução o *software* se encontra? E quais os planos futuros?

Como objeto de pesquisa em acústica de salas, o programa de simulação RAIOS constitui um desafio permanente. Tendo sido desenvolvido inicialmente no âmbito do PEM, COPPE, UFRJ e, posteriormente, no LIDAV, Instituto Politécnico, UERJ, atualmente é desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSM. Todavia, como toda a programação é feita na linguagem C++, há necessidade de haver estudantes de mestrado ou doutorado que dominem a linguagem — além de, naturalmente, terem boas noções de acústica de salas. Por essa razão, o desenvolvimento tem sido feito, por assim dizer, “aos soluços”.

Atualmente, temos dado atenção a duas vertentes de desenvolvimento do programa. A primeira diz respeito ao estudo dos fenômenos de baixa frequência. Abaixo da frequência de corte de uma sala, os métodos de acústica geométrica [8] sabidamente não funcionam bem, o que é crucial em salas de pequeno porte. Atualmente, em cooperação com o Prof. Eric Brandão, da UFSM, venho desenvolvendo uma metodologia para realizar simulação em baixa frequência via método dos elementos de contorno (BEM), que tem apresentado bons resultados, levando a uma dissertação de mestrado [36] e duas publicações internacionais [11, 37]. O próximo passo, nessa vertente, é incorporar o modelo modal já desenvolvido ao código computacional RAIOS, possivelmente gerando uma Versão 8 do programa. A segunda vertente diz respeito à utilização de técnicas de inteligência artificial para produzir *aurilização dinâmica*, ou seja, para gerar aurilização com o receptor biauricular em movimento no interior de uma sala. Essa pesquisa está atualmente em desenvolvimento a partir de uma colaboração internacional envolvendo a UFSM e a Escuela Politécnica Nacional, Equador, onde um doutorando em Engenharia da Computação está sendo coorientado por mim e pelo Prof. José F. L. Naranjo. Um primeiro resultado parcial foi publicado no final do ano passado [38].

As discrepâncias ainda encontradas após quatro intercomparações internacionais (RRs) entre os valores simulados pelos diversos programas e os dados medidos parecem indicar que, por um lado, os algoritmos ainda necessitam de aperfeiçoamentos e, por outro, ainda há muita incerteza nos dados de entrada nos programas (basicamente, coeficientes de absorção e de espalhamento),

principalmente em baixa frequência, e que as técnicas de medição *in loco* desses coeficientes também necessitam ser melhor investigadas.

4. O *software* é comercial? É aberto ou aberto para pesquisa?
Quais são os desafios para atrair usuários?

Quando o programa RAIOS estava ainda em sua Versão 6, a empresa GROM Acústica & Vibrações mostrou-se interessada em comercializar o *software*. A razão principal, creio eu, foi o fato de o programa possuir uma excelente interface gráfica e uma lógica de operação muito simples e ser bastante estável, além, naturalmente, de ter apresentado excelentes resultados comparativos no RR3, como já mencionado. A GROM, portanto, é o distribuidor exclusivo do *software* RAIOS. A ideia básica foi poder oferecer à comunidade dos acústicos do Brasil um programa intuitivo, de fácil utilização, boa estabilidade, confiável e, principalmente, de baixo custo. Para se ter uma ideia comparativa, o custo de comercialização de uma licença do RAIOS 7, é cerca de 12% do preço de uma licença de um *software* correspondente (Auditorium) do fabricante mais famoso, no câmbio atual.

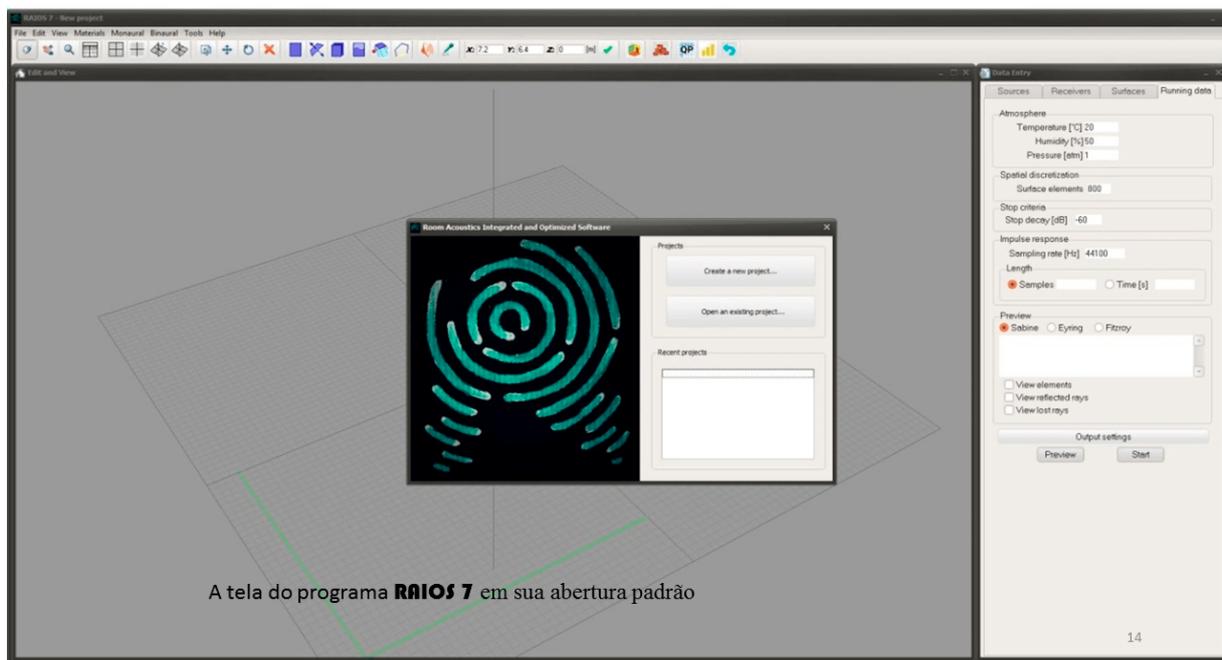
O programa sempre foi aberto para os estudantes da universidade onde este pesquisador está atuando. Assim foi na UFRJ e na UERJ e, atualmente, o programa está disponível para uso dos alunos da Graduação em Engenharia Acústica (EAC) e dos mestrandos e doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSM, onde atuo. Diversos desses alunos vêm utilizando o programa em suas pesquisas acadêmicas, o que fornece um importante retorno para seu contínuo desenvolvimento.

Além disso, o programa RAIOS 7 possui um *demo* disponível para qualquer interessado que o solicite (ver página do pesquisador em <https://ratenenbaum.wixsite.com/acustica>). Esse *demo* possui todas as funcionalidades do programa RAIOS 7 com a única restrição de que só pode rodar as (muitas) salas nele incluídas, inclusive salas dos RR3 e RR4. Isso permite que o usuário se habitue aos comandos do programa e, efetivamente, aprenda a utilizá-lo.

2.3 Funcionalidades do RAIOS

As funcionalidades do programa RAIOS 7 são inúmeras e seria impraticável apresentá-las todas aqui. Para bem compreendê-las e melhor dominá-las, minha sugestão ao interessado é testar diretamente o programa, utilizando para tal o seu *demo*. Todavia, tentaremos apresentar aqui um apanhado geral das principais ferramentas disponíveis no programa e suas funcionalidades. A Figura 3 apresenta a tela padrão do RAIOS 7 ao ser aberto no computador. Vê-se uma linha superior com a Barra de Menus e logo abaixo uma Barra de Ferramentas, utilizada na edição de modificações da sala. A janela central, em cinza mais escuro, é onde a sala a ser simulada é visualizada, mostrando o *logo* do programa ao centro. À direita, tem-se o campo de entrada de dados, descrito mais adiante, onde são inseridos os dados de fontes sonoras, receptores, superfícies de contorno e condições atmosféricas.

A Figura 4 mostra a Barra de Menus do programa. Esta contém os menus: *File*, onde salas podem ser abertas, fechadas ou salvas e resultados de simulação podem ser importados ou exportados; *Edit*, onde superfícies, fontes sonoras e receptores podem ser inseridos ou modificados; *View*, em que se pode escolher os tamanhos e disposição das janelas do programa; *Materials*, onde se pode acessar uma ampla lista de materiais de contorno, importar ou exportar materiais e editar valores de coeficientes de absorção ou espalhamento; *Monaural*, onde os resultados monauriculares de simulação são acessados; *Binaural*, com o qual se acessa o módulo de geração das respostas impulsivas biauriculares e o de produção de auralizações; *Tools*, onde se acessa o útil editor de sinais e os resultados dos parâmetros biauriculares; e, finalmente, *Help*, que dá acesso ao Manual do Usuário embarcado.



A tela do programa **RAIOS 7** em sua abertura padrão

Figura 3: Tela padrão de abertura do programa RAIOS 7.

A BARRA DE MENUS (Os recursos do programa)

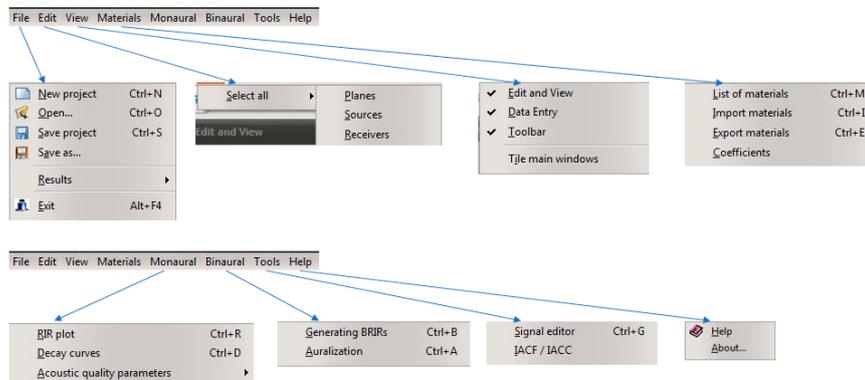
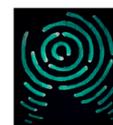


Figura 4: Barra de Menus do programa RAIOS 7.

O menu *Materials* está detalhado na Figura 5. A opção *List of materials* abre uma janela onde uma listagem com mais de mil materiais de acabamento de superfícies está disponível, com seus respectivos coeficientes de absorção e espalhamento, para seleção. A opção *Import materials* permite importar um material pré-editado. A opção *Export materials* permite exportar para a área de trabalho um material não constante da listagem de materiais e editar seus coeficientes de absorção e espalhamento.

A Figura 6 ilustra com algum detalhamento as opções do menu *Monoaural results*. A opção *RIR plot* abre a resposta impulsiva monoauricular para o par fonte-receptor selecionado. São visualizáveis, a RIR global (especular, difusa ou híbrida) ou filtrada por bandas de oitava (63–16 kHz). O botão *Listen* permite ouvir a RIR. A opção *Decay curves* abre a visualização das curvas de decaimento para o par fonte-receptor selecionado. As curvas de decaimento são também visualizadas em valores global e

por bandas de oitava, selecionáveis. Finalmente, a opção *Acoustic quality parameters* abre uma tabela com 14 parâmetros de qualidade acústica (T_{20} , T_{30} , EDT, C_{80} , D_{50} , entre outros), sempre em valores globais e por bandas de oitava. Os parâmetros podem ser visualizados também em forma gráfica, como ilustrado na figura, que mostra o gráfico de T_{30} nas nove bandas.

A BARRA DE MENUS (Detalhando – Materials)

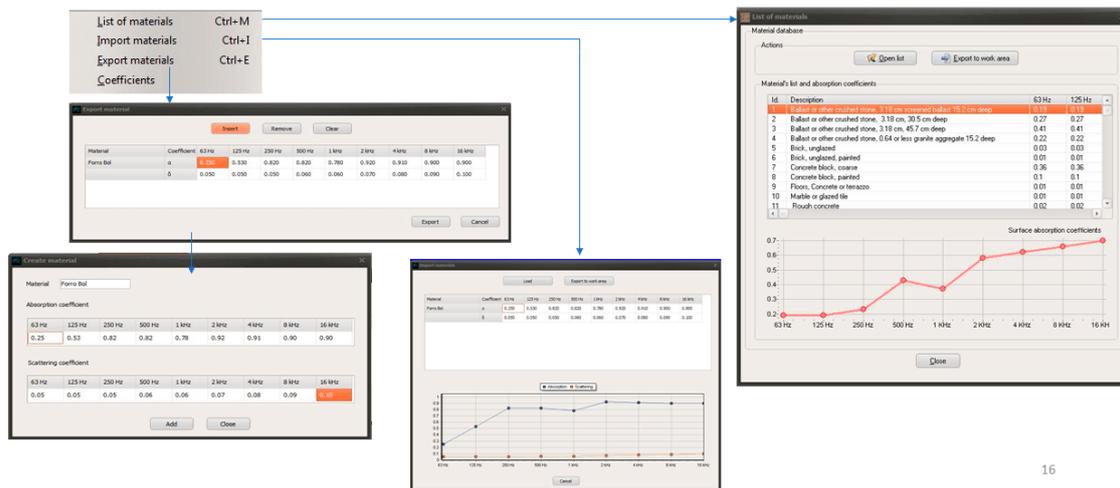


Figura 5: Detalhe do menu *Materials*.

A BARRA DE MENUS (Detalhando – Monoaural results)

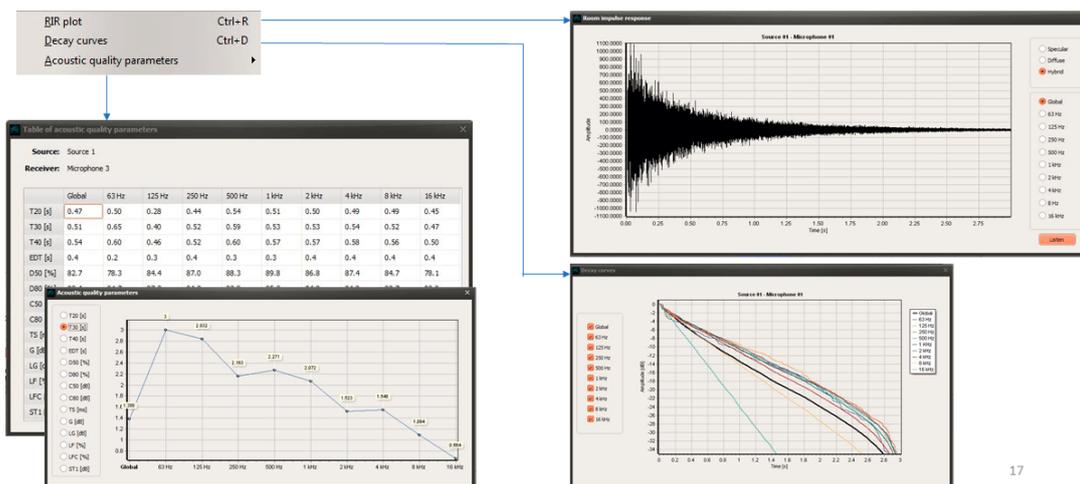


Figura 6: Detalhe do menu *Monoaural results*.

A Figura 7 apresenta, resumidamente, as opções que se abrem no menu *Binaural results*, em particular na opção *Generating BRIRs*. O módulo de geração de BRIRs oferece diversas alternativas. Primeiramente, carregam-se os raios acústicos previamente calculados para o par fonte-receptor selecionado. Marcando-se a opção *Load and view the rays*, abre-se a janela indicada na sub-figura superior direita, que indica a direção de chegada dos raios acústicos (especulares e difusos) que atingem o receptor.

O número de raios é indicado no quadro *Number of rays*. Em seguida, seleciona-se a orientação da cabeça sobre o torso (usualmente, essa rotação é nula e nada precisa ser alterado no quadro HATO [°]). Várias orientações podem ser selecionadas nesse quadro, lembrando que o tempo de cálculo será proporcional ao número de orientações indicadas. O quadro *Output* apresenta as opções de saída, indicando o arquivo e o nome do arquivo onde a BRIR será gravada, o tipo de arquivo de saída (.txt e/ou .wav), seu comprimento e tipo de cálculo.

A BARRA DE MENUS (Detalhando – Binaural results)

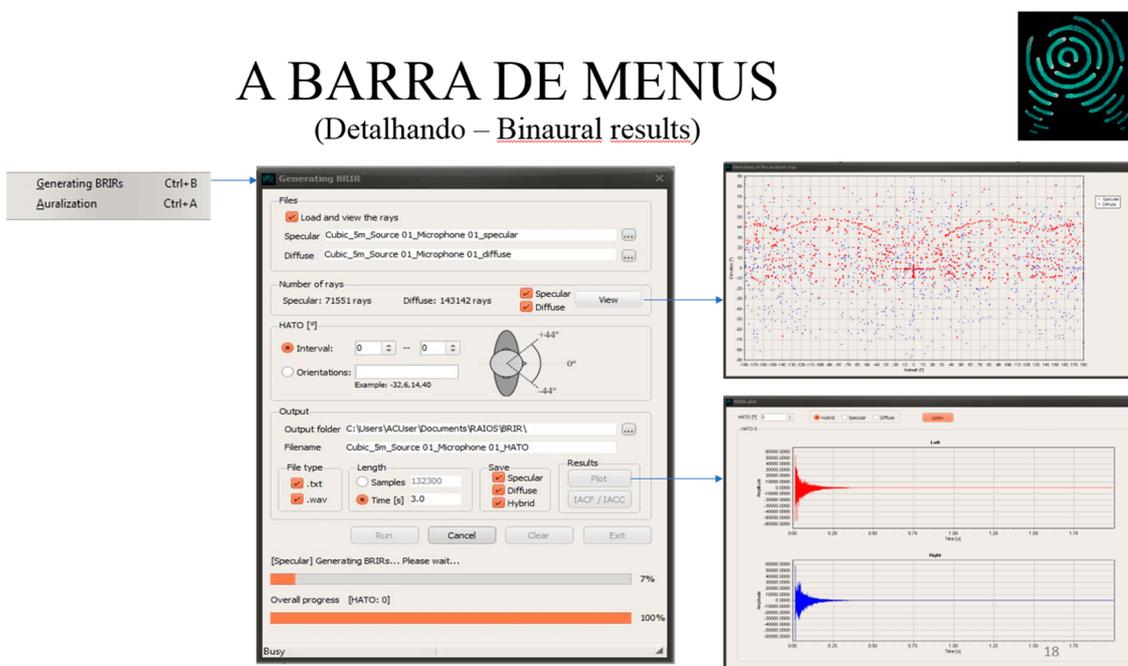


Figura 7: Detalhe do menu *Binaural results*.

A BARRA DE MENUS (Detalhando – Auralization)

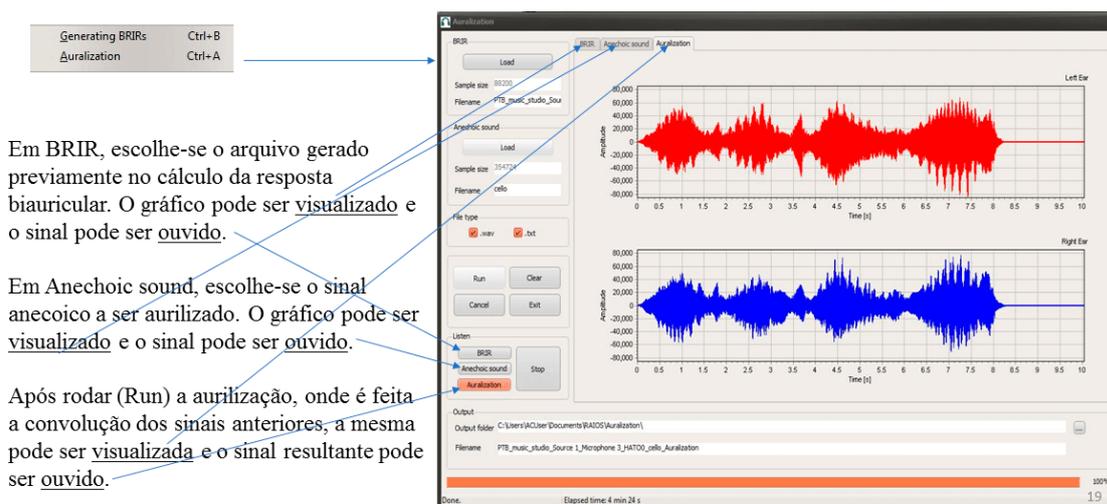


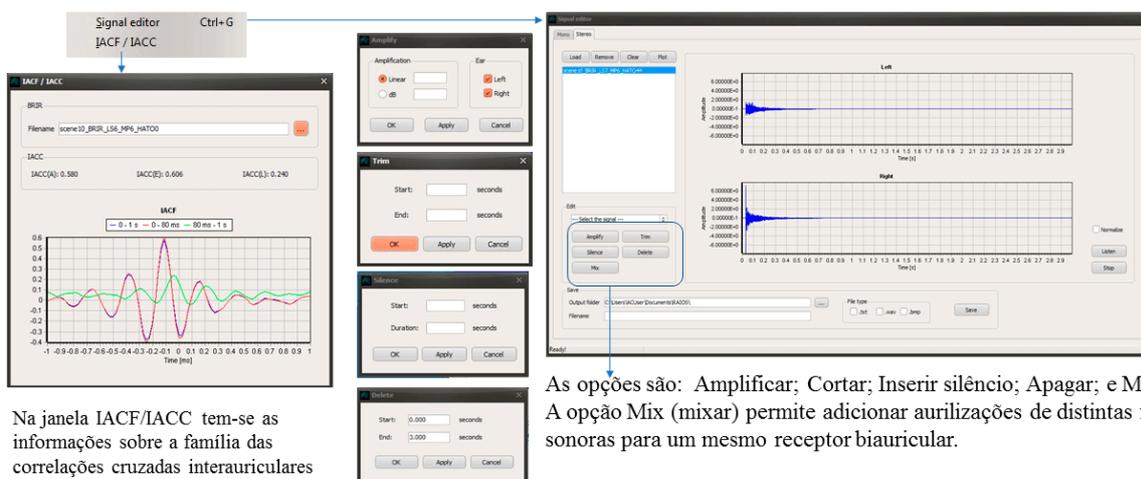
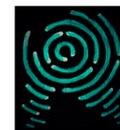
Figura 8: Detalhe do menu *Auralization*.

O botão *Run* dá início ao cálculo da(s) BRIR(s) e o andamento é indicado nas barras de evolução inferiores. Finalizado o cálculo, o botão *Plot* é habilitado e pode-se visualizar os gráficos da BRIR

(orelha esquerda em vermelho e direita em azul, na Figura 7) e ouvi-la, preferencialmente com uso de fones, premindo-se o botão *Listen*.

A Figura 8 ilustra a opção *Auralization*, dentro do menu *Binaural results*. A figura é auto-explicativa. Seleciona-se a BRIR e o sinal anecoico a serem utilizados, e roda-se sua convolução, obtendo-se a aurilização. A barra de evolução inferior atualiza o andamento do processo e o quadro *Output* indica onde é gravado o resultado.

A BARRA DE MENUS (Detalhando – Tools)



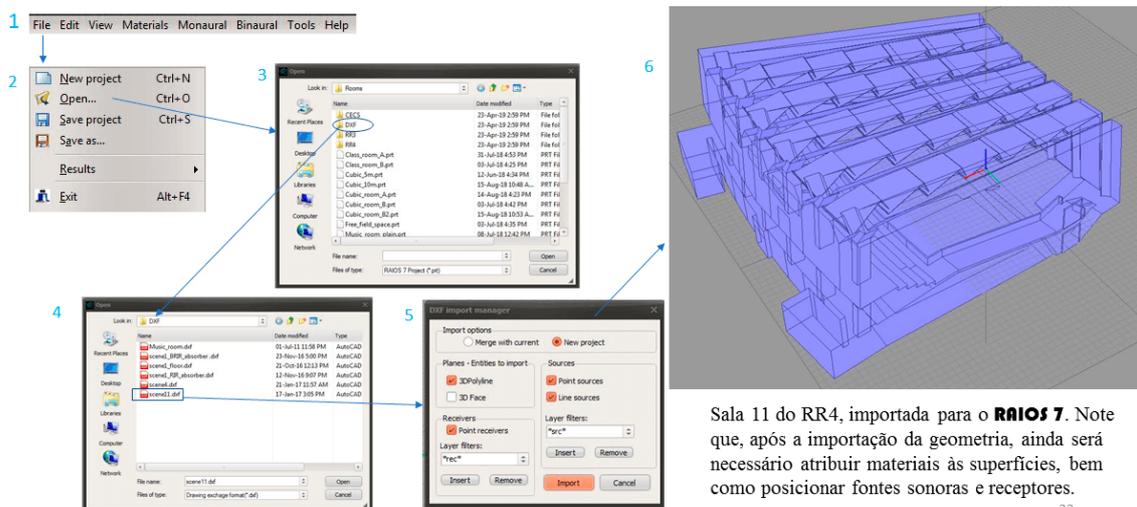
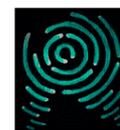
Na janela IACF/IACC tem-se as informações sobre a família das correlações cruzadas interauriculares

As opções são: Amplificar; Cortar; Inserir silêncio; Apagar; e Mixar. A opção Mix (misturar) permite adicionar aurilizações de distintas fontes sonoras para um mesmo receptor binauricular.

20

Figura 9: Detalhe do menu *Tools*.

IMPORTANDO UMA SALA EM DXF



Sala 11 do RR4, importada para o **RAIOS 7**. Note que, após a importação da geometria, ainda será necessário atribuir materiais às superfícies, bem como posicionar fontes sonoras e receptores.

32

Figura 10: Dentro do menu *File* importando uma sala em *.dxf*.

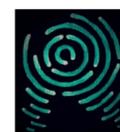
A Figura 9 mostra, no menu *Tools*, alguns recursos da opção *Signal editor* que, como indicado, permite:

amplificar; atenuar; cortar; inserir; apagar parte; e mixar diversos canais. A mixagem é extremamente útil, por exemplo, para avaliar subjetivamente o efeito simultâneo de várias fontes sonoras no interior de uma sala (ver exemplo sonoro na [página do pesquisador](#)).

A Figura 10 ilustra sumariamente o procedimento de importação de uma sala em arquivo .dxf para tornar-se um arquivo .prt (de PRoJeTo), proprietário do RAIOS 7. No Menu *File*, seleciona-se a opção *Open*, em seguida a opção *DXF* e, finalmente, escolhe-se um dos arquivos .dxf disponíveis. Isso abrirá a janela *DXF import manager*, em que uma série de opções podem ser selecionadas. Na Figura 10, a Sala 11 do RR4 (a maior e mais complexa do certame) está sendo importada.

E como se faz para executar a simulação de uma sala no programa RAIOS 7? Bem, isso é feito na aba *Running data* dentro da janela *Data entry*, ilustrada na Figura 3. Nessa aba, introduzem-se os parâmetros necessários para a simulação (número de raios, decaimento etc.). Em seguida, aperta-se o botão *Preview* que faz uma prévia da simulação (com cerca de mil raios) para verificar se há algum erro grosseiro na sala (um plano invertido, por exemplo). No *Preview* é também executado o cálculo do volume e da área da superfície da sala, bem como os tempos de reverberação segundo as fórmulas estatísticas de Sabine, Eyring ou Fitzroy. Bem, agora é o momento de realizar a simulação numérica da sala completa, ou seja, utilizando-se o método híbrido do programa RAIOS 7. Aperta-se o botão *Run* e cinco etapas de simulação vão aparecendo na tela, sequencialmente, tal como ilustrado na Figura 11: 1. checagem da sala; 2. alocação de memória; 3. cálculo das reflexões especulares; 4. cálculo das reflexões difusas; e 5. cálculo das respostas impulsivas. Ao final da simulação, o tempo total de cálculo é apresentado.

RODANDO A SIMULAÇÃO



A simulação da sala é iniciada com o botão



A simulação se dá em cinco etapas sucessivas:

1/5. Checando a sala;



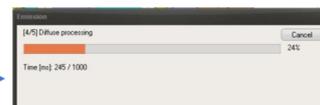
2/5. Alocando memória;



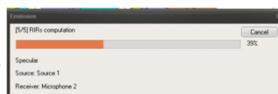
3/5. Cálculo reflexões especulares;



4/5. Cálculo reflexões difusas;



5/5. Cálculo respostas impulsivas.



Ao final da simulação, o programa indica o tempo total de cálculo.

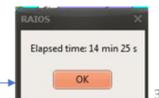


Figura 11: As diversas etapas da simulação.

Um brevíssimo apanhado geral de como opera o código computacional RAIOS 7 e suas principais funcionalidades foram aqui apresentadas. Contudo, como mencionado anteriormente, há um sem-número de detalhes que só o dia a dia da utilização do programa permitirá apreciar. Reitero, portanto, a sugestão de — em havendo real interesse do gentil leitor no programa — solicitar o *demo* na página do pesquisador, usando-o exaustivamente. Quem sabe você se apaixona pelo RAIOS 7?

3. BRASS

O *Brazilian Room Acoustic Simulator* (BRASS) é um programa totalmente desenvolvido na UFRJ pelo Prof. Julio Torres, desde 2014. O BRASS surgiu da necessidade de criar uma ferramenta capaz de produzir respostas impulsivas pelo método do traçado de raios, que fosse independente de uma interface gráfica de programação, para testes de métodos e de implementações.

Atualmente, o BRASS 2.0 é distribuído em duas versões: com e sem interface gráfica. O programa participou da intercomparação internacional mais recente de simulação acústica, o *Round Robin 4*, obtendo resultados muito próximos aos dos demais simuladores — inclusive dos comerciais, que já estão em desenvolvimento há mais de 20 anos — e com diferenças pouco significativas entre os valores obtidos por simulação e por medição.

O BRASS ainda não está sendo comercializado, mas pode ser utilizado gratuitamente por pesquisadores de universidades públicas e privadas, sob demanda. No site www.lisa.poli.ufrj.br/brass é possível baixar a versão de demonstração, que possui apenas restrições na quantidade máxima de planos, fontes e receptores simultâneos, juntamente com o manual de utilização. Maiores detalhes sobre a implementação podem ser obtidos em Torres et al. [39, 40].

3.1 Prof. Julio Torres (pequena biografia)

Mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ nos anos 1998 e 2004, respectivamente, ingressou como docente na UFRJ em 2004 e atualmente é Professor Titular, lotado na Escola Politécnica. É também docente do corpo permanente dos Programas de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ e de Engenharia Urbana da Escola Politécnica. Em 2014, realizou estágio de pós-doutorado no tema de simulação acústica, no Instituto de Acústica Técnica da Universidade RWTH-Aachen, quando iniciou o desenvolvimento do BRASS. Atua nas áreas de acústica, processamento de sinais, desenho e CAD e desenvolve projetos em acústica e sonorização de ambientes, além de coordenar pesquisa em sistemas de realidade virtual acústica, com enfoque em processamento digital de sinais, audibilização, simulação acústica de salas, de ambientes urbanos e da poluição sonora.

3.2 Entrevista com o criador do BRASS

Nesta seção temos uma pequena entrevista com perguntas e respostas com o professor Julio Torres.

1. Como foi a motivação para começar o projeto e o nascimento do programa?

Em experiência prévia no desenvolvimento de módulos de outro simulador, verificou-se que o uso de ambientes para construção de janelas, com botões, caixas de texto e gráficos, por exemplo, dificultava a atualização dos modelos internos, além de criar dependência de licenças e até descontinuidade das interfaces, obrigando muitas vezes a remodelagem do programa, pois partes das variáveis eram componentes dos sistemas de janelas, como, por exemplo, o conteúdo de uma caixa de texto ser o valor de um coeficiente de absorção. Assim, optou-se por desenvolver um simulador cuja entrada e saída de dados e resultados se dessem somente por arquivos em formato texto.

O principal motivador para a criação do BRASS foi desvincular o núcleo central, que implementa o(s) método(s) de simulação, da interface de entrada de dados e de apresentação de resultados. Esse tipo de abordagem de programação permite que, com a mesma interface de apresentação de resultados, diversos métodos possam ser desenvolvidos, testados e sobrepostos, pois os principais “produtos” da simulação são, em geral, respostas impulsivas, das quais se obtém os parâmetros acústicos e a audibilização. Por outro lado, com o mesmo núcleo de simulação,

diversas interfaces podem ser desenvolvidas, acompanhando a evolução das ferramentas de visualização e de processamento de áudio.

O BRASS foi inicialmente desenvolvido sem interface gráfica, de forma que os dados de entrada e de saída são armazenados em arquivos de texto, com uma estrutura em tópicos bastante simples. Dessa forma, qualquer desenvolvedor pode elaborar uma interface em Python ou Matlab, por exemplo, que armazene os dados necessários à simulação em um arquivo com o formato específico do BRASS, executar separadamente o núcleo principal de simulação (através de bibliotecas de *link* dinâmico ou do próprio executável) e, em seguida, apresentar graficamente os resultados que o BRASS gera, também em formato texto. Isso traz bastante versatilidade ao *software* que pode sempre ser atualizado de forma independente, seja no método ou na interface.

Outro aspecto que motivou a adoção de um núcleo separado da interface foi evitar a (re)criação de módulo de edição de superfícies. Como todos os métodos acústicos requerem uma modelagem geométrica das superfícies, não faz sentido desenvolver ou “competir” com programas extremamente avançados de modelagem 3D existentes no mercado.

Após disponibilizar a versão sem interface para pesquisadores, houve a necessidade de criação de uma interface gráfica “mínima” para atender aos usuários que não estão familiarizados com ambientes de programação. Desenvolveu-se então a versão com interface gráfica, que tem evoluído constantemente em função das demandas dos alunos que vêm utilizando o simulador e dos problemas e dificuldades apontados.

2. Como foi a decisão sobre os métodos empregados?

Dentre os diversos métodos, o BRASS utiliza somente o traçado de raios, como mostrado na Figura 12. A opção por esse método deu-se pela facilidade de execução do método e pela possibilidade de aproveitamento do “lançamento” dos raios para outros métodos que podem ser executados em paralelo ou a posteriori, tais como o de radiosidade, o método de difusão e de espalhamento proposto por Dalenback [41] ou mesmo um método modal que estamos desenvolvendo. Métodos de imagens possuem uma limitação muito severa de uso de memória, o que limita a estimativa da parte reverberante das respostas das salas.

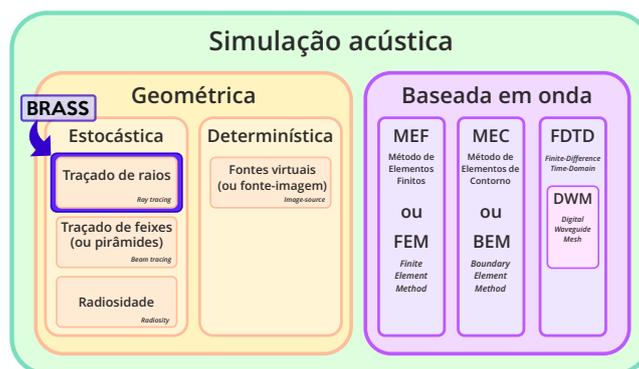


Figura 12: Método utilizado no BRASS.

3. Em que etapa de evolução o *software* se encontra? E quais os planos futuros?

Atualmente, o programa possui um pacote de instalação com dois executáveis: uma versão puramente em linha de comando (*prompt* do Windows) e outra com uma interface de usuário (GUI), desenvolvida, principalmente, para atender a uma demanda dos alunos do curso de arquitetura que têm utilizado o BRASS em suas pesquisas. Porém, mesmo na versão por linha de comando, a visualização do modelo é possível, em que há uma opção para apresentar o modelo.

Está em desenvolvimento uma *interface web* que permitirá aos projetistas acessarem um site, com um *login/senha*, fazer a transferência de um arquivo de CAD, em formato DXF, com seu projeto, já incluindo superfícies, fontes e receptores. Na interface serão vinculadas propriedades acústicas, tais como absorção, difusão ou direcionalidade no caso de fontes e receptores. O núcleo de propagação será então executado no próprio servidor da UFRJ e os dados estarão posteriormente disponíveis para o cliente do site, sejam tabelas ou arquivos de áudio.

4. O *software* é comercial? É aberto ou aberto para pesquisa?
Quais são os desafios para atrair usuários?

O *software* completo atualmente está disponível gratuitamente, em formato de DLLs ou executável, apenas para pesquisadores. Existe uma versão de demonstração para usuários em geral. A versão demonstrativa possui restrições quanto ao número máximo de planos de um modelo, número de fontes e receptores simultâneos. Não creio que o problema seja atrair os clientes, mas sim criar uma estrutura de manutenção e desenvolvimento do *software* que garanta uma excelente “usabilidade”, capaz de prever problemas nos modelos que os usuários elaboram e que possam causar resultados não previstos ou *bugs*. Acredito que um programa de custo médio ou por assinatura e de fácil manuseio seja o caminho para que arquitetos, engenheiros e entusiastas busquem cada vez mais esse tipo de simulador.

3.3 Funcionalidades do BRASS

As etapas comumente seguidas para se obter a simulação acústica de um recinto, na maioria dos simuladores, consistem em: (1) elaborar o modelo geométrico; (2) importar o modelo e associar propriedades acústicas aos elementos geométricos; (3) definir os parâmetros do(s) método(s) e (4) analisar e apresentar os resultados. Todas as configurações do projeto são armazenadas em um único arquivo em formato texto, que pode ser alterado com um editor de texto simples. A Figura 13 apresenta a tela principal da versão com interface gráfica. No lado esquerdo tem-se as abas de controle e de configuração, enquanto, à direita, tem-se as abas de apresentação de resultados e de visualização do modelo. No BRASS não é possível editar as superfícies do modelo geométrico. É possível somente

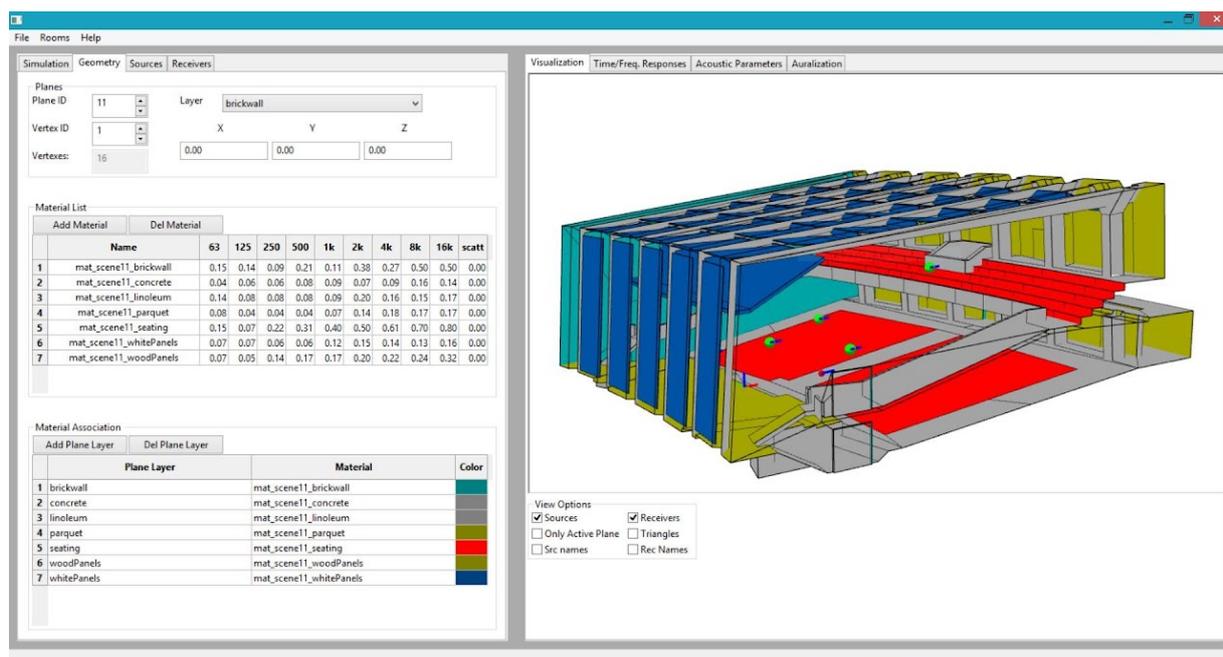


Figura 13: Tela principal do BRASS.

alterar a camada à qual pertence o plano ou o material associado às camadas. Toda a edição na geometria deve ser realizada em *software* de CAD capaz de exportar o modelo em formato DXF. O BRASS importa planos, receptores e fontes do arquivo DXF, conforme as camadas e os tipos de objetos. A Figura 14 apresenta a tela de importação, após a seleção do arquivo DXF. Na parte central são apresentadas todas as camadas contidas no arquivo DXF e a opção do usuário para separar os elementos das camadas em fontes, receptores e planos. Somente objetos CAD do tipo POINT são reconhecidos como fontes e receptores, demais objetos são ignorados nessa importação. Os objetos reconhecidos pelo BRASS para importar superfícies planas são: 3DPOLYLINE, 3DFACE e 3DPOLYFACEMESH, o que flexibiliza a modelagem. É possível fazer a importação para um projeto já existente, ou seja, que já inclua elementos ou criar um novo projeto.



Figura 14: Tela de importação do BRASS.

Caso o usuário não tenha familiaridade com programas de CAD e deseje fazer simulações de salas com geometrias simplificadas, o BRASS possui um módulo de criação de salas, conforme mostrado na Figura 15, que é acessado no menu superior “Rooms -> Standard Rooms”. Variando as dimensões indicadas, é possível criar diversas combinações de formas. Ao definir o modelo geométrico, os planos são criados e separados em três grupos de *layers*, apenas para facilitar a posterior organização dos materiais.

Como alternativa à construção do modelo geométrico de forma visual, também é possível entrar com as informações dos planos em formato de texto. Essa opção é útil para pesquisadores e para testes que requerem muitas repetições e/ou criação de muitos modelos, que variem, por exemplo, o comprimento da sala ou que desejem avaliar diferentes opções de materiais, posições de fontes etc. Dessa forma, a entrada de dados dos planos pode ser feita por programação em qualquer linguagem capaz de gerar arquivos texto.

Após a etapa de importação, o usuário pode criar ou alterar camadas e materiais, editando as respectivas tabelas, conforme mostrado na Figura 16. O usuário define então o coeficiente de absorção por banda de oitava e um coeficiente de espalhamento global (aplicado a todas as bandas) para cada material e o associa a uma ou mais camadas. É importante que o projetista, na fase de elaboração do modelo, já separe as superfícies de acordo com seu propósito ou material, para facilitar a posterior associação dos materiais. Na parte da direita é possível visualizar individualmente os planos para conferir detalhes do modelo.

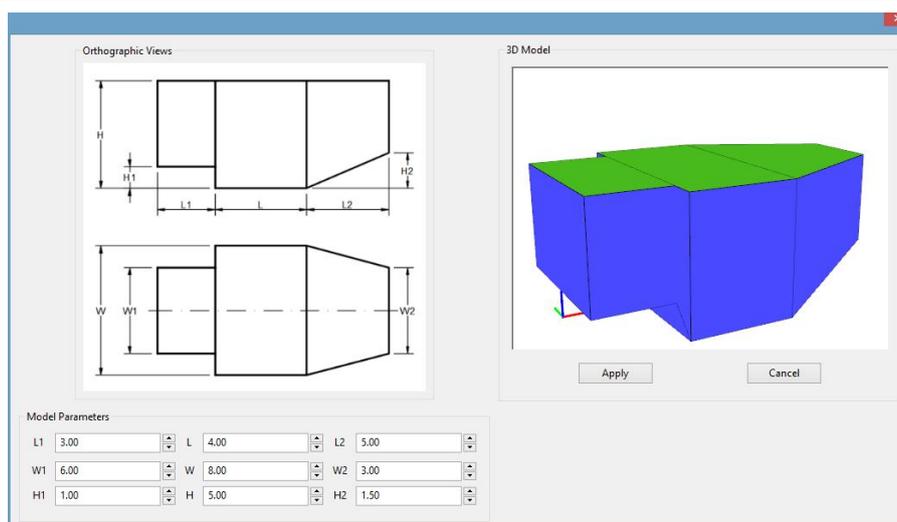


Figura 15: Tela de criação de salas.

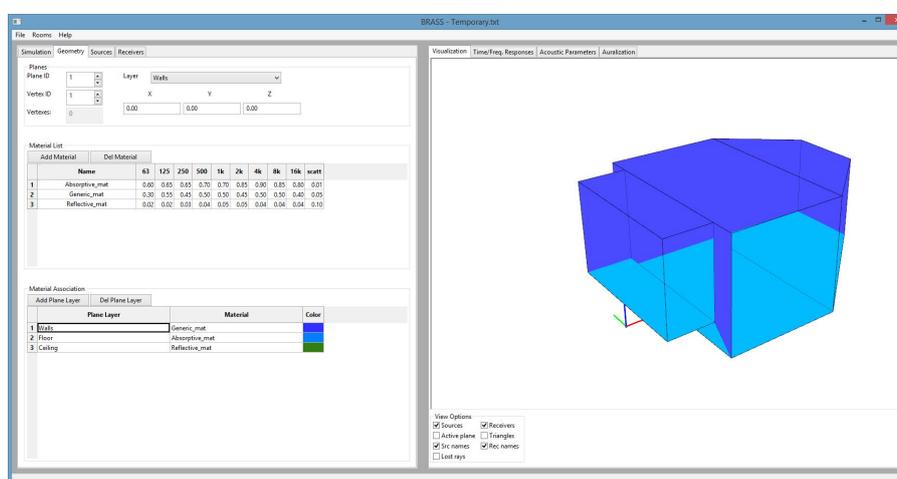


Figura 16: Área de configuração dos planos, camadas e materiais.

Nas abas de fontes e receptores, o usuário pode inserir camadas, que funcionam como “tipos”. Para cada camada é associada uma direcionalidade. A lógica é a mesma para fontes e receptores. É possível, por exemplo, criar uma camada ou tipo de fonte “caixa acústica modelo X” e associar um arquivo no formato OpenDAFF [42] com a medição acústica da referida caixa. Alternativamente, pode-se criar um receptor do tipo “microfone” e associar a ele um padrão onidirecional de captação. No BRASS estão disponíveis os seguintes padrões de direcionalidade: onidirecional, cardióide, supercardióide, hipercardióide e “figura em oito”. Primeiro é necessário criar, no mínimo, uma camada de receptores e de fontes, para então inserí-los. Cada fonte ou receptor pertencerá a uma respectiva camada. No projeto de um cinema, por exemplo, é possível criar uma camada de fontes do tipo “caixas surround” e inserir diversas dessas fontes, que possuem o mesmo padrão de direcionalidade. Caso o projetista deseje alterar o modelo de caixa acústica a ser usado, basta alterá-lo na camada, que todas as fontes dessa camada ficarão automaticamente associadas ao novo padrão de direcionalidade. O posicionamento dos elementos é feito ajustando os valores nas tabelas. Ainda não é possível selecionar com mouse e mover os objetos no modelo geométrico.

Definidos os principais componentes do modelo acústico (planos, fontes e receptores) é necessário configurar os parâmetros da simulação. Além de temperatura, umidade e pressão, pode-se definir a taxa de amostragem, o tempo de duração das respostas ao impulso, o número de raios das fontes, o

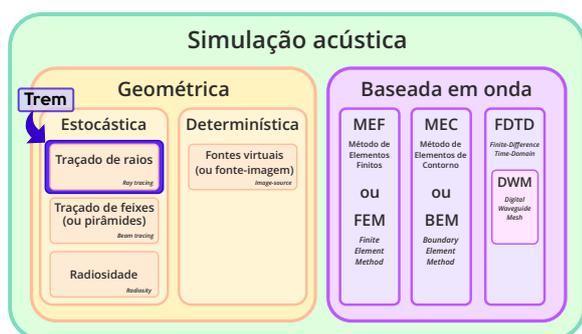
número máximo de reflexões e a energia mínima relativa de um raio para continuar propagando. São os chamados “critérios de parada” do algoritmo de traçado de raios. A versão atual do BRASS (2.0) executa somente o traçado de raios, incluindo espalhamento, ou seja, a cada reflexão de um raio, parte de sua energia é transmitida diretamente para os receptores “visíveis” de acordo com o fator de espalhamento da superfície. Para executar essa parte de difusão do som, é necessário marcar a opção “*Diffuse Processing*”, que aumenta consideravelmente o tempo de simulação. Existe também a opção de simular a cauda reverberante em vez de obtê-la puramente pelo traçado de raios. Nesse caso, é feita uma estimativa do decaimento utilizando 10% do número de raios de cada fonte e a cauda é preenchida com um ruído filtrado por bandas. Nesse modo, todos os raios da fonte são lançados, mas somente 10% deles seguem refletindo até que algum critério de parada seja atendido. A propagação dos demais 90% é interrompida quando a distância percorrida pelo raio é superior àquela em que o receptor tem probabilidade de capturar apenas um ou nenhum raio. Isso ocorre nos primeiros milissegundos após o som direto e depende do número de raios lançados pela fonte e do raio de ação do receptor. Durante a simulação, os dados sobre cada raio que atinge o(s) receptor(es) são armazenados em arquivos texto e ficam disponíveis para o usuário. Para cada raio são armazenados: a direção em que este atingiu o receptor, a energia por banda de oitava, o número de reflexões e a direção na qual foi lançado pela fonte. Assim, pesquisadores podem analisar e visualizar os resultados conforme a necessidade. Há opção para armazenar todos os raios refletidos (não somente aqueles capturados pelos receptores), permitindo calcular a resposta ao impulso em qualquer posição da sala, desde que a posição da fonte não seja modificada. Essa bordagem permite armazenar “o campo de raios” e realizar o processamento necessário para movimentar e/ou rotacionar os receptores pelo ambiente. Esse módulo de movimentação e audibilização ainda não está implementado, porém os dados ficam disponíveis para os que desejarem desenvolver.

Por último, é possível habilitar ou desabilitar o processo de audibilização, com fontes e receptores estáticos. Caso seja ativado, as respostas ao impulso de cada par fonte-receptor serão convoluídas com arquivos de áudio em formato exclusivamente WAV. Ficam disponíveis novos arquivos de áudio para cada par e também o somatório das fontes para cada receptor, considerando as potências das fontes. Contudo, cabe ressaltar que se os arquivos de áudio, preferencialmente anecoicos, possuírem níveis diferentes, isso alterará a energia total (potência da fonte + energia do sinal), podendo levar a percepções erradas entre as potências das fontes combinadas. Conforme o tipo de arquivo ou padrão de direcionalidade de cada receptor, os arquivos de áudio são gerados com o mesmo número de canais. Assim, se a direcionalidade de um receptor for definida por meio de medições de funções de transferência relativas à cabeça, por exemplo, o áudio para esse receptor será gerado em 2 canais. No caso de um microfone, o áudio será monoauricular. Da mesma forma, um arranjo de microfones pode ser simulado, gerando tantos canais quantos microfones forem configurados no arquivo de direcionalidade (DAFF).

Como resultados, além das informações sobre o traçado de raios, são produzidas tabelas em formato texto para cada par fonte-receptor, contendo os principais parâmetros de qualidade acústica: T_{60} , T_{30} , T_{20} , C_{80} , D_{50} , EDT, Tempo central, Nível de pressão sonora (NPS) por bandas (global e ponderado em A) e o NPS do som direto. Na janela de visualização podem ser apresentadas as respostas ao impulso em escala linear, em Pascal, ou em escala logarítmica, as curvas de decaimento e o módulo da resposta em frequência de cada par fonte-receptor.

4. Trem

O Trem é um algoritmo baseado em traçado de raios clássico (veja a Figura 17 (a)), com algumas melhorias. Ele integra as linguagens Python e C++. A parte em Python é usada como interface com os dados de entrada e saída. A parte em C++ é responsável pela computação mais pesada do método de traçado de raios. Além disso, a linguagem Python pode ser usada para construir uma interface 3D com o *software* Blender. A Figura 17 (b) apresenta uma animação de traçado de partículas (3D *billiard*) como exemplo¹ — exportar esse tipo de animação ainda não é uma funcionalidade padrão do Trem.



(a)

(b)

Figura 17: (a) Método utilizado no Trem; e (b) Exemplo de traçado de partículas (3D *billiard*).

4.1 Prof. Eric Brandão (pequena biografia)

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (Unifei, Itajubá, MG). cursou o mestrado e doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na área de vibrações e acústica. Atualmente é professor do curso de graduação em Engenharia Acústica (EAC) e do Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil (PPGEC) da UFSM. As disciplinas lecionadas são acústica de salas, processamento de sinais e eletroacústica. Sua pesquisa é dedicada a duas linhas principais: a medição *in-situ* das características de absorção e espalhamento de materiais acústicos e a acústica computacional. Na medição *in-situ* da absorção e espalhamento sonoros várias técnicas podem ser usadas, incluindo os arranjos de sensores, técnicas de regularização e aprendizado de máquina. Na acústica computacional, o trabalho de pesquisa foca no desenvolvimento de plataformas *open-source* para a simulação em acústica de salas.

4.2 Entrevista com o criador do Trem

Nesta seção temos uma pequena entrevista com perguntas e respostas com o professor Eric Brandão.

¹Utilize o Acrobat PDF Reader para poder ver a animação clicando no botão de play abaixo dela.

1. Como foi a motivação para começar o projeto e o nascimento do programa?

Houve motivações de diferentes naturezas. Primeiramente, a ideia era compreender a fundo e dominar as técnicas de simulação em acústica geométrica, tão utilizadas em acústica de salas. Também identifiquei que havia uma necessidade de aprofundamento nas linguagens de programação Python, Matlab e C++, particularmente na combinação entre elas. Outra motivação é que a implementação de um código de simulação permite a criação de metodologias de pesquisa mais abrangentes, que não seriam possíveis com *software* comerciais, já que eles têm uma interface fechada. Por fim, posso dizer que também houve uma motivação econômica, no sentido de tornar a Engenharia Acústica da UFSM (e outros grupos parceiros) tão independentes quanto possível das licenças comerciais, que podem ter um custo elevado.

2. Como foi a decisão sobre os métodos empregados?

O projeto se iniciou em 2018 usando a linguagem Matlab, que era a que eu mais dominava na época. Como esta é uma linguagem interpretada, ficou claro que seria um *software* muito lento dessa forma. Assim, decidi fazer uma combinação, usando Matlab para a interface de entrada e saída de dados, e a linguagem C++ para a parte computacional mais pesada (observe a Figura 18). Ao fim de 2019, apresentei o projeto a um colega do ramo da engenharia de *software* (Gonçalo Morgado [14]), que sugeriu a migração do projeto para uma linguagem que pudesse ser totalmente *open-source* e integrada ao Blender² (um *software* também *open-source* para modelagem 3D). A partir daí, migramos para a utilização de Python e C++ com diversas melhorias de processamento em relação à versão anterior (veja a Figura 19).

3. Em que etapa de evolução o *software* se encontra? E quais os planos futuros?

Pode-se dizer que o *software* é composto de dois projetos independentes. O primeiro é o motor de cálculos, o qual descrevi nas perguntas anteriores. Este é inteiramente baseado em traçado de raios, com algumas melhorias discutidas na referência [14]. O segundo projeto é a interface de usuário, implementada por meio de um pacote que pode ser instalado no Blender. Ainda temos muitas limitações em relação aos comerciais e esperamos melhorar o projeto no futuro. A interface com usuário requer um tipo de atenção específica da ergonomia de *software*. Já para o motor de cálculos, pretendemos implementar um modelo híbrido (fontes virtuais e traçado de raios), a renderização de respostas mono e binauriculares, a inclusão de direcionalidade das fontes etc. Na Engenharia Acústica, também temos conduzido pesquisa na implementação de métodos de simulação mais apropriados às baixas frequências e uma integração com acústica geométrica também poderá ocorrer no futuro.

4. O *software* é comercial? É aberto ou aberto para pesquisa?

Quais são os desafios para atrair usuários?

O *software* é livre e o código fonte pode ser obtido no *link*: <https://github.com/gmagno/ra>. Seria muito apreciado de minha parte ouvir os comentários dos usuários e saber que pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a ferramenta. Acredito que existam vários desafios aos usuários, no entanto. Temos um investimento severamente limitado e isso faz com que não tenhamos um instalador pra gerenciar os diversos pacotes que usamos. Além disso, nossa documentação ainda é limitada, mas estamos trabalhando pra melhorar isso.

²<https://www.blender.org>.

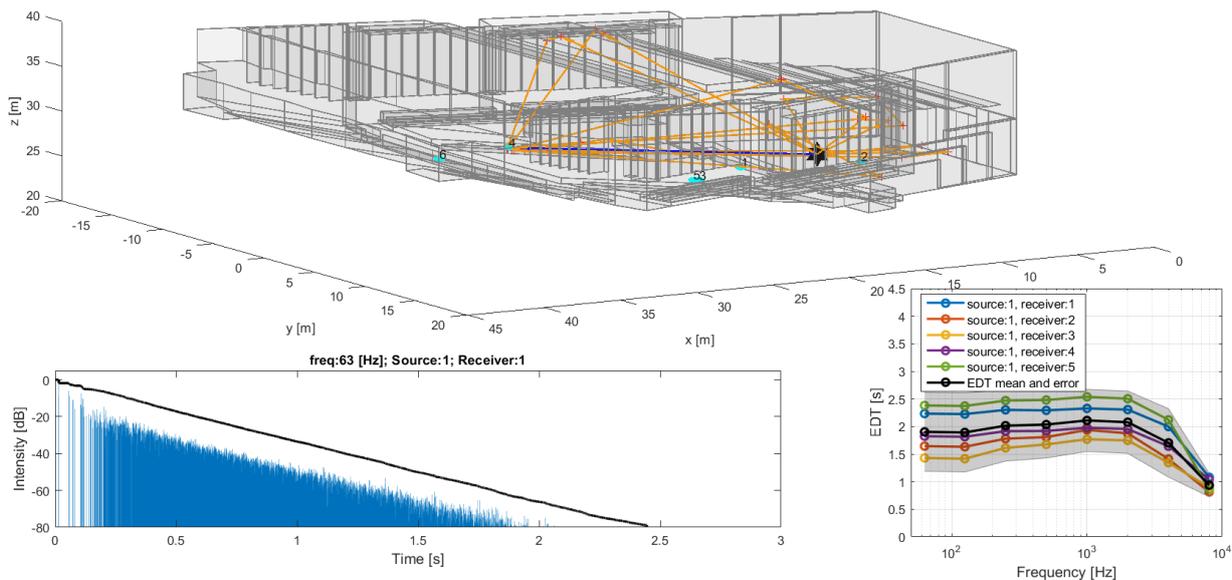


Figura 18: Figuras geradas na saída de dados da versão Matlab e C++.

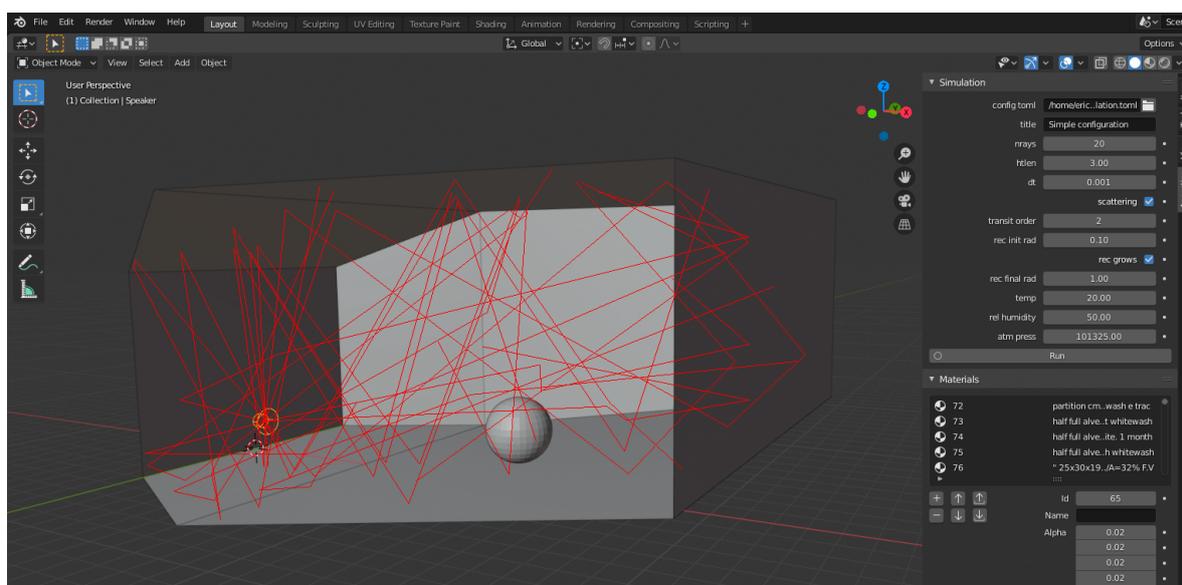


Figura 19: Figuras geradas pela interface do Blender na versão Python e C++.

4.3 Funcionalidades do Trem

As principais funcionalidades podem ser encontradas na referência [14] em detalhes, mas posso citar algumas de forma breve:

- O código é livre, o que implica que você pode fazer várias coisas com ele que não pode fazer em um *software* que apenas te expõe a interface com o usuário.
- O código tem diversas funções e classes para facilitar a vida do pesquisador. Você não precisa conhecer C++ profundamente para tirar vantagem do código em si, já que as funções e classes implementadas em C++ também recebem um código responsável por expô-las à linguagem Python.

- A computação do traçado geométrico dos raios é desacoplada da computação da energia atingindo cada receptor na sala. Isso implica que, se você troca um material de absorção, pode apenas rodar a parte do código que calcula a energia, o que é bem mais rápido que calcular o traçado geométrico dos raios.
- O item anterior permite cálculos de incerteza em simulações de acústica geométrica usando o método de Monte Carlo, algo que descrevemos brevemente na referência [14].

5. Considerações finais

Este artigo, em forma de encarte da A&V 53, buscou apresentar de forma abreviada o histórico e contexto de técnicas de simulação para acústica de salas, bem como, a auralização que acompanha tal evolução. Ademais, um dos propósitos foi aclarar o protagonismo de desenvolvimentos brasileiros, fundamentados em pesquisas dentro das universidades.

Com isso, apresentou-se de forma pormenorizada os programas RAIOS, BRASS e Trem, desenvolvidos respectivamente pelos professores Roberto A. Tenenbaum, Julio Torres e Eric Brandão — todos de universidades brasileiras, comprovando capacidade e sucesso, reafirmados por suas publicações na área.

Incentivamos o/a leitor(a) a testar os programas e, eventualmente, tecer cooperações de trabalho e pesquisa com os desenvolvedores.

Referências

1. SPANDÖCK, F. Akustische modellversuche. *Annalen der Physik*, v. 412, n. 4, p. 345–360, jul. 1934. doi: [10.1002/andp.19344120402](https://doi.org/10.1002/andp.19344120402).
2. KROKSTAD, A.; STROM, S.; SØRSDAL, S. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, v. 8, n. 1, 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).
3. FONSECA, William D'Andrea. *Software para simulação de acústica de salas*. Disciplina EAC1032 - Auralização (2021). Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS.
4. ALLEN, Jont B.; BERKLEY, David A. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 65, n. 4, p. 943–950, 1979. doi: [10.1121/1.382599](https://doi.org/10.1121/1.382599).
5. BORISH, Jeffrey. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 75, n. 6, p. 1827–1836, 1984. doi: [10.1121/1.390983](https://doi.org/10.1121/1.390983).
6. 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. doi: [10.1121/1.398336](https://doi.org/10.1121/1.398336).
7. LEWERS, T. A combined beam tracing and radiatn exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, v. 38, n. 2, p. 161–178, 1993. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/0003-682X\(93\)90049-C](https://doi.org/10.1016/0003-682X(93)90049-C).
8. 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. doi: [10.1121/1.4926438](https://doi.org/10.1121/1.4926438).
9. 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.solucaoatrio.net.br/atrio/ufjr-pem_upl//THESIS/1660/pemufjr1991mscmarcosdelimaballesteros_20150825122313512.pdf.
10. GOMES, Marcio H. A.; BERTOLI, S. R.; DEDECCA, Joao Gorenstein. Implementação de métodos para a simulação acústica e auralização de salas. *Acústica e Vibrações*, v. 23, n. 38, p. 12–24, maio 2007.
11. SOARES, Murilo Cardoso; BRANDÃO, Eric; TENENBAUM, Roberto Aizik; MAREZE, Paulo Henrique. Low-frequency room acoustical simulation of a small room with BEM and complex-valued surface impedances. *Applied Acoustics*, v. 188, p. 108570, 2022. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2021.108570](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108570).
12. SCHMID, Aloísio Leoni. Tecnologia nacional em simulação acústica para ver e ouvir ambientes futuros. *Engenharia e Construção*, v. 28, p. 31–34, maio 2006.
13. MOURA, Henrique Gomes de. *Simulação da propagação de ondas acústicas através de uma malha de guia digital de ondas*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14998>.
14. BRANDÃO, Eric; MORGADO, Gonçalo; FONSECA, William D'Andrea. A ray tracing engine integrated with Blender and with uncertainty estimation: Description and initial results. *Building Acoustics*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 2, p. 99–118, 2020. doi: [10.1177/1351010X20964758](https://doi.org/10.1177/1351010X20964758).
15. ISO 3382-1:2019 Acoustics – Measurement of room acoustics parameters – Part 1: Performance spaces. Geneva, 2009. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/40979.html#:~:text=ISO3382-1:2009specifies,andpresentingthetestreport>.
16. ISO 3382-2:2008 Acoustics – Measurement of room acoustics parameters – Part 2: Reverberation times in ordinary room. Geneva, 2008. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/36201.html>.

17. ISO 3382-3:2012 Acoustics – Measurement of room acoustics parameters – Part 3: Open plan offices. Geneva, 2012. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/46520.html>.
18. CAMILO, Thiago S. *Método híbrido para simulação de acústica de salas: combinação dos métodos de traçado de raios e transição de energia*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEM/COPPE/UF RJ, 2003.
19. TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES, J. C. B.; GERGES, S. N. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part I – theoretical and numerical aspects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, p. 211–221, set. 2007. ISSN 1806-3691. doi: [10.1590/S1678-58782007000200012](https://doi.org/10.1590/S1678-58782007000200012).
20. ALARCÃO, Diogo; COELHO, José Luis Bento; TENENBAUM, Roberto A. On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach. In: EUROPEAN ACOUSTICS ASSOCIATION. *Proceedings of EAA Symposium on Architectural Acoustics*. Madrid, 2000. p. 1–7.
21. 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, 2005. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaau/2005/00000091/00000004/art00015>.
22. 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, 2005. ISSN 1610-1928. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaau/2005/00000091/00000004/art00016>.
23. TENENBAUM, Roberto A.; CAMILO, Thiago S.; TORRES, Julio Cesar 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. 222–231, set. 2007. ISSN 1806-3691. doi: [10.1590/S1678-58782007000200013](https://doi.org/10.1590/S1678-58782007000200013).
24. NARANJO, José F. L. *Aperfeiçoamentos no código computacional RAIOS incluindo auralização*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PPGMC/IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2010. Disponível em: <https://www.btdt.uerj.br:8443/handle/1/13844>.
25. TORRES, Júlio C. B. *Sistema de auralização eficiente utilizando transformadas wavelet*. Tese (Tese de doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004. Disponível em: <http://www.pee.uerj.br/index.php/pt/producao-academica/teses-de-doutorado/2004/2004037002-2004037002/file>.
26. NARANJO, José F. L. *Inteligência computacional aplicada na geração de respostas impulsivas biauriculares e em auralização de salas*. Tese (Tese de doutorado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PPGMC/IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2014. Disponível em: <http://www.btdt.uerj.br/handle/1/13684>.
27. TAMINATO, F. O. *Redes neurais artificiais aplicadas à modelagem de HRIRs/HRTFs para gerar auralização*. Tese (Tese de doutorado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PPGMC/IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2018. Disponível em: <https://www.btdt.uerj.br:8443/handle/1/13714>.
28. TENENBAUM, Roberto A.; TAMINATO, Filipe O.; MELO, Viviane S. G. Room acoustics modeling using a hybrid method with fast auralization with artificial neural network techniques. In: OCHMANN, Martin; VORLÄNDER, Michael; FELLS, Janina (Ed.). *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*. Aachen: [s.n.], 2019. p. 1–8. doi: [10.18154/RWTH-CONV-238784](https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-238784).
29. 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. 1–8, 2020. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2019.07.041](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.07.041).
30. ASPÖCK, Lukas; BRINKMANN, Fabian; ACKERMANN, David; WEINZIERL, Stefan; VORLÄNDER, Michael. *BRAS - Benchmark for Room Acoustical Simulation*. 2020. Online. doi: [10.14279/depositonce-6726.3](https://doi.org/10.14279/depositonce-6726.3), acesso em dezembro de 2021.
31. 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. doi: [10.1121/1.5096178](https://doi.org/10.1121/1.5096178).
32. MELO, Viviane S. G.; TENENBAUM, Roberto A.; SANTOS, Edna S. de O.; SAMPAIO, Gabriel B. R. Validação de programa de simulação acústica de salas via intercomparação internacional e aferição de inteligibilidade. *Acústica e Vibrações*, v. 36, n. 53, p. 109–123, 2021. doi: [10.55753/aev.v36e53.29](https://doi.org/10.55753/aev.v36e53.29).
33. BRANDÃO, Eric; SANTOS, Edna S. O.; MELO, Viviane S. G.; TENENBAUM, Roberto A.; MAREZE, Paulo H. On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation. *Applied Acoustics*, v. 187, p. 108484, 2022. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2021.108484](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108484).
34. 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>.
35. ÖZİŞİK, M. Necati. *Boundary Value Problems of Heat Conduction*. Dover Publications, 1989. (Dover Books on Engineering). ISBN 978-0486659909. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=CSwbAQAAIAAJ>.
36. SOARES, Murilo C. *Ferramenta de código aberto para simulação em acústica de salas na região de baixa frequência*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, PPGEC, Santa Maria, RS, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22615>.
37. SOARES, Murilo C.; BRANDÃO, Eric; TENENBAUM, Roberto A.; ALVIM, Luiz A. T. F. A study case applying a method to retrieve complex surface impedances from statistical absorption coefficients aiming room acoustics simulation using Boundary Element Method. In: INCE. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering, 2020. v. 261, n. 5, p. 1698–1709. ISSN 0736-2935. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/ince/incecp/2020/00000261/00000005/art00085>.
38. SANAGUANO, Daniel A.; LUCIO-NARANJO, Jose F.; TENENBAUM, Roberto A. A conceptual model for real-time binaural-room impulse responses generation using anns in virtual environments: State of the art. In: *2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2020. p. 572–578. doi: [10.1109/CSCI51800.2020.00102](https://doi.org/10.1109/CSCI51800.2020.00102).
39. TORRES, Julio C. B. *BRASS - Brazilian Room Acoustic Simulator*. In: *SOBRAC. XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*. Porto Alegre: Galoá, 2018. ISSN 2238-6726. doi: [10.17648/sobrac-87152](https://doi.org/10.17648/sobrac-87152).
40. TORRES, Julio Cesar B.; ASPÖCK, Lukas; VORLÄNDER, Michael. Comparative study of two geometrical acoustic simulation models. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, n. 6, p. 300, May 2018. ISSN 1806-3691. doi: [10.1007/s40430-018-1226-1](https://doi.org/10.1007/s40430-018-1226-1).
41. COX, Trevor John; DALENBÄCK, Bengt-Inge; D'ANTONIO, Peter; EMBRECHTS, Jean Jacques; JEON, Jin Yong; 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/aaau/2006/00000092/00000001/art00002>.
42. OpenDAFF. *An open source file format for directional audio content*. 2021. Online. Acesso em dezembro de 2021. Disponível em: <https://www.opendaff.org>.