

Acústica e Vibrações

50

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Acústica e Vibrações

Sociedade Brasileira de Acústica - Sobrac

Dezembro de 2018 - Vol. 33 ▶ N° 50

Dispositivo rastreador de movimentos da cabeça baseado em Arduino: construção e utilização em acústica

Técnica rápida para geração de auralizações utilizando redes neurais artificiais

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

Medição in situ de impedância acústica com arranjo de microfones e algoritmos promotores de esparsidade

Desempenho acústico de paredes: influência do preenchimento de blocos cerâmicos com vermiculita expandida

A acústica dos espaços urbanos em microescala: geometria e acurácia em modelos virtuais

Mapa de ruído como ferramenta de diagnóstico e projeto

Instruções e modelo de artigo para a Revista Acústica e Vibrações (2018–2021)

ISSN 2764-3611 (e), 1983-442X (i)

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Acústica & Vibrações

n. 50, dezembro de 2018, vol. 33

doi: [10.55753/aev.v33e50](https://doi.org/10.55753/aev.v33e50)
<https://revista.acustica.org.br>

ISSN: 2764-3611 (e) | 1983-442X (i)



Comissão Editorial

Editor-Chefe

William D'Andrea Fonseca | ✉

English Proofreader

Joseph Lacey | ✉

Capa e Diagramação

William D'Andrea Fonseca

Endereços Sobrac

UFSM – Centro Tecnológico – Sala 212
Av. Roraima no 1000, Camobi
Santa Maria, RS, Brasil - 97105-900
www.acustica.org.br | ✉

Diretoria Sobrac 2020–2022

Presidente: Stelamaris Rolla Bertoli | ✉
Vice-presidente: Débora Miranda Barretto | ✉
1º Sec.: Maria Lygia Alves de Niemeyer | ✉
2º Sec.: Krisdany V. S. M. Cavalcante | ✉
1º Tesoureiro: Roberto Jordan | ✉
2º Tesoureiro: Gustavo S. V. de Melo | ✉

Conselhos

Deliberativo 2015–2018

Gustavo da Silva V. de Melo, Dinara Xavier da Paixão, Fabiana Curado Coelho, Léa Cristina L. de Souza, Ranny L. X. N. Michalski.

Deliberativo 2017–2020

Newton Sure Soeiro, Ricardo E. Musafir, Julio A. Cordioli, Márcio H. de Avelar Gomes, Bianca Carla D. de Araújo

Fiscal 2017–218

Maria Lucia G. da Rosa Oiticica, Gilberto Fuchs de Jesus, Cândida de Almeida Maciel.

Informações

Todos os artigos publicados passam por um sistema de revisão-parecer duplo-cego antes da aceitação. Os pareceristas são profissionais com conhecimento notável no assunto. Os conteúdos dos artigos são de responsabilidade dos autores.

Sumário

| | |
|-----------------|---|
| Editorial | 3 |
|-----------------|---|

Artigos

| | |
|--|----|
| Dispositivo rastreador de movimentos da cabeça baseado em Arduino: construção e utilização em acústica | 5 |
| Técnica rápida para geração de auralizações utilizando redes neurais artificiais | 25 |
| Resultados comparativos para a Sala 10 do Round Robin 4 obtidos pelo código computacional RAIOS 7 | 39 |
| Medição <i>in situ</i> de impedância acústica com arranjo de microfones e algoritmos promotores de esparsidade | 53 |
| Desempenho acústico de paredes: influência do preenchimento de blocos cerâmicos com vermiculita expandida .. | 65 |
| A acústica dos espaços urbanos em microescala: geometria e acurácia em modelos virtuais | 75 |
| Mapa de ruído como ferramenta de diagnóstico e projeto | 93 |

Modelo de artigo AeV

| | |
|---|-----|
| Instruções e modelo de artigo para a Revista Acústica e Vibrações (2018–2021) | 107 |
|---|-----|

Encartes e Chamadas A&V

| | |
|--|-----|
| Associe-se à Sobrac | 119 |
| 12º Congresso Iberoamericano de Acústica & XXIX Encontro da Sobrac | 121 |
| Eventos de acústica pelo Brasil e o mundo | 123 |
| Criando a capa comemorativa da Acústica e Vibrações nº50 | 129 |

Contents in English

| | |
|-----------------------------------|-----|
| <i>Editorial in English</i> | 133 |
|-----------------------------------|-----|

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Editorial

A Comissão Editorial da **Revista Acústica e Vibrações** apresenta a **Edição n°50 comemorativa** com grande satisfação. Ela traz várias novidades para autores e leitores, isto é, inovações para a revista e artigos que ela contém.

Internacionalização é algo importante para revistas científicas e técnicas, promovendo o acesso ao conteúdo por um público maior. Assim, buscando a internacionalização para a A&V, a primeira página de cada artigo funcionará como a identificação do trabalho/artigo. Ela conterá além de título, nomes, filiações, resumo e palavras-chave, também (os novos campos) PACS, *title*, *abstract* e *keywords*.

Como novidade, ainda na primeira página, haverá um código único de identificação, o chamado DOI (*Digital Object Identifier*), sendo o artigo cadastrado em um base de dados internacional, facilitando o acesso para que ele seja encontrado na internet. Com isso, espera-se mais acessos e que os artigos sejam mais citados.

Os modelos de arquivo (*templates*) para a escrita de novos artigos foram renovados, sendo disponibilizadas versões para escrita em L^AT_EX e Ms Word. Eles estão disponíveis tanto no [website da Sobrac](#), quanto no [Overleaf](#). As instruções foram todas reescritas, contemplando normas de escrita e formato. Com isso, padronizam-se os estilos, tornando as submissões já no formato final do artigo. A partir deste número, as referências bibliográficas passam a ser numeradas (assim como permitido na normativa brasileira).

A revista digital completa (em PDF), agora contém links clicáveis e marcadores (*bookmarks*), facilitando a navegação. Todos os artigos são abertos à direita, por isso eventualmente algumas *páginas em branco* constam no número completo.

Com as atualizações supracitadas, a **Revista Acústica e Vibrações** está com sua diagramação semelhante às grandes revistas do ramo como, por exemplo, o [Journal of the Acoustical Society of America](#) e o [Journal of Sound and Vibration](#).

A&V é, como sabemos, uma revista congregadora que abrange diversas áreas do conhecimento. Neste número trazemos sete artigos, organizados em uma ordem em que se busca alguma conexão com o seguinte.

O primeiro artigo versa sobre a construção de um aparato para rastreamento de cabeça, utilizando *hardware* de baixo custo. Na sequência, tem-se um artigo com o uso de redes neurais artificiais para a aplicação em acústica virtual, utilizando-se também de HRTFs.

Ainda empregando muito de processamento de sinais, o terceiro artigo apresenta “Resultados comparativos para a Sala 10 do Round Robin 4 obtidos pelo código computacional RAIOS 7”, aclarando os cenários e mostrando os parâmetros objetivos obtidos. No quarto artigo, explora-se o uso de arranjos de microfones para a estimativa *in situ* de impedância acústica, parâmetro de notável importância em acústica computacional.

No quinto artigo, a revista vai na direção de sistemas construtivos e arquitetura, apresentando a “influência do preenchimento de blocos cerâmicos com vermiculita expandida” para paredes, constando aspectos experimentais e resultados pertinentes.

O sexto artigo faz a ponte entre arquitetura e modelos virtuais para simulação, discutindo pormenores da geometria e resultados de simulação. Por fim, o último artigo (não menos importante) traz o “mapa de ruído como ferramenta de diagnóstico e projeto”, destacando aspectos de regulamentação e examinando resultados.

Após os artigos técnicos, existem ainda alguns elementos ao final deste número. O primeiro deles é o artigo modelo, intitulado “Instruções e modelo de artigo para a Revista Acústica e Vibrações (2018–2021)”, que pode ser usado como guia para os autores.

Tem-se, na sequência, as chamadas: associe-se a Sobrac (com informações para novos interessados em se associar), chamada especial para o 12º Congresso Iberoamericano de Acústica - FIA 2020 em conjunto com o XXIX Encontro da Sobrac (que será realizado em Florianópolis, SC) e uma seção dedicada com uma bela lista de “congressos de acústica pelo mundo”, elencando datas, locais e websites. Ainda, uma breve descrição do processo de criação da capa comemorativa desta edição está colocado no encarte final. Finalmente, a edição é fechada com o editorial em língua inglesa.

É muito importante tecer aqui o agradecimento à Diretoria da Sobrac pelo convite, aos autores e ao grupo de revisores, pelo árduo e bonito trabalho, imprescindíveis para tornar realidade esta publicação.

Cordialmente,

Prof. Dr. William D’Andrea Fonseca

(Editor-Chefe AeV)

Dispositivo rastreador de movimentos da cabeça baseado em Arduino: construção e utilização em acústica

Bom, E. B. ; Fonseca, W. D'A. ; Brandão, E. ; Mareze, P. H. 

Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
{enzo.bom, will.fonseca, eric.brandao, paulo.mareze}@eac.ufsm.br

Resumo

Dispositivos de rastreamento são geralmente instrumentos que fornecem informação de rotação e/ou translação de uma determinada pessoa (ou objeto), podendo esse dado ser utilizado em diversas aplicações. Especificamente associados aos movimentos da cabeça, tais dispositivos são denominados *head-trackers*. Eles são extremamente úteis no contexto de acústica virtual (e auralização), em que o conhecimento da orientação do receptor é de grande importância para medições e processamento. Com base no instrumento desenvolvido no projeto Mr. Head Tracker, de concepção original na Universidade de Graz, na Áustria, cujo o intuito era criar um dispositivo de rastreamento de baixo custo, foi concebido e montado um protótipo funcional utilizando *hardware* e *software* na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Nesta implementação, utilizando Arduino, foram projetadas uma cadeia de reprodução e uma cadeia de medição/gravação binauriculares. A verificação do excelente funcionamento de tais cadeias foi realizada a partir de procedimentos experimentais, sendo eles testes subjetivos e medições acústicas. Com isso, o objetivo deste artigo é apresentar os passos dessa nova proposta de construção, constando alterações em relação ao projeto original e elaborando detalhes (e avanços alcançados). São apresentados também os resultados de sua aplicação (assim como sua metodologia), compostos de três testes realizados com a cadeia de reprodução proposta, a fim de aclarar seu comportamento e suas limitações. Os resultados demonstram que o dispositivo funcionou de maneira adequada com os códigos computacionais desenvolvidos, apresentando acordo com a teoria e expectativas de projeto.

Palavras-chave: tecnologia binauricular, acústica virtual, auralização, rastreamento de movimentos.

PACS: 43.66.Pn, 43.66.Yw, 43.66.Qp, 43.28.Tc, 43.20.Ye.

Arduino-based Head-tracking device: assembly and application in acoustics

Abstract

Tracking devices can be generically defined as instruments that provide position information for a person or object, supplying rotation and/or translation data. Thus, they can be used in different applications in engineering. As they concern head movements specifically, these devices are called head-trackers and are extremely useful in the field of virtual acoustics (and auralization), where it is crucial to know a receiver's position (data used to post-process acoustic information). Based on the low-cost head-tracker developed from the project named Mr. Head Tracker at the University of Graz, Austria, a new hardware-software functional prototype was assembled at the Federal University of Santa Maria (UFSM), Brazil. Two different binaural application chains were designed: reproduction and recording/measurement. The excellent performance of the systems was assessed through experiments, including subjective tests and acoustical measurements. With that in mind, the purpose of this article is to describe the steps of this novel Arduino-based construction approach, encompassing modifications from the original design and detailing the specific aspects and achievements made. The methodology and results of the three subjective tests conducted using the reproduction chain are also included and detailed. These tests clarify the behavior and limitations of the system constructed. In general, results have shown that the device works in accordance with the codes developed, matching theory and project expectations.

Keywords: binaural technology, virtual acoustics, auralization, movement tracking device.

1. INTRODUÇÃO

No contexto da tecnologia biauricular [1], tanto para reprodução quanto para captação de sinais biauriculares (que são aqueles que carregam os efeitos de difração do corpo do ser humano sobre uma onda sonora incidente) é extremamente importante ter a informação da localização do receptor (que pode ser uma pessoa ou um *manequim*¹) em termos de rotação e translação. Para isso, muitas vezes são utilizados dispositivos de rastreamento chamados de *head-trackers*. Esses instrumentos têm como finalidade fornecer dados sobre a posição e orientação da cabeça receptora em questão. Tais informações podem ser utilizadas, por exemplo, em aplicações para gerar movimentos em um ambiente virtual a partir de movimentos reais [2] ou fornecer informações de ângulo em medições de *Head-Related Transfer Functions*² (HRTFs, Funções de Transferência Relativas à Cabeça ou ainda Funções de Transferência Anatômicas) [4]. Essas funções descrevem objetivamente a interação entre a fonte sonora e a antropometria do receptor, de forma que existe, para cada posição angular fonte-receptor no espaço 3D, uma função diferente.

Com a proposta de inicialmente ser utilizado como um instrumento MIDI³ [5, 6] em uma *Digital Audio Workstation*⁴, o projeto original nomeado Mr. Head Tracker⁵ foi desenvolvido no Institute for Electronic Music and Acoustics (IEM) da Universidade de Graz, na Áustria [8]. Um dos objetivos foi implementar o dispositivo com base em placas Arduino [9] para criar um instrumento de custo reduzido.

Buscando cadeias de reprodução e gravação biauriculares, elaborou-se na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) um protótipo adaptado, mantendo ainda a ideia de dispositivo de baixo custo. Utilizou-se ainda de *software* adicionais para a comunicação com aplicações em

¹Também encontrado como *cabeça artificial*, *dummy-heads*, simulador de cabeça e tronco ou Head-and-Torso Simulator (HATS).

²Sua versão no domínio do tempo é chamada de *Head-Related Impulse Response* ou HRIR [3].

³Musical Instrument Digital Interface.

⁴DAW, por exemplo, Reaper, ProTools ou Ableton Live.

⁵O projeto também pode ser acessado em seu site [Git](#) [7].

Matlab e Pure Data (assim como seria necessário para funcionar adequadamente em DAWs).

O foco principal deste artigo é então o procedimento de construção e implementação desse dispositivo, salientando as diferenças em relação ao projeto original. São apresentados também testes realizados para estimar a eficácia do aparato no rastreamento de posições diversas.

2. FUNDAMENTOS

Para melhor entendimento de algumas etapas e conceitos do trabalho, se faz necessário o desenvolvimento de uma breve fundamentação teórica, desenvolvida a seguir.

2.1 Eixos e coordenadas de movimento

No contexto de rastreamento de movimento, além dos graus de liberdade associados aos movimentos de translação nos eixos X , Y e Z , são também definidos movimentos de rotação em torno deles. Esses três movimentos são denominados *yaw*, *pitch* e *roll*⁶, sendo eles respectivamente associados aos eixos Z , Y e X . Considerando o centro geométrico da cabeça de uma pessoa como a origem desses eixos, tem-se que Z é o vetor que aponta para cima, X para a frente da pessoa e Y para a esquerda. Logo, define-se *yaw* como o movimento de virar a cabeça para esquerda e/ou direita, *pitch* como o movimento de olhar para cima e/ou para baixo e *roll* de deitar a cabeça em direção aos ombros. Para facilitar o entendimento, observe a Figura 1 que demonstra a situação citada.

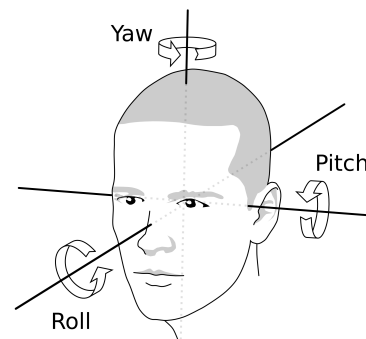


Figura 1: Cabeça centrada na origem do eixo de coordenadas X , Y e Z (movimentos associados *roll*, *pitch* e *yaw*) — retirado de Jantunen *et al.* [10].

⁶Termos muito utilizados em navegação, traduções incluem: guinada (*yaw*), inclinação ou arfagem (*pitch*) e rolamento ou giro (*roll*). Utilizar-se-á a nomenclatura em inglês por questões de compatibilidade de *software*.

Por convenção⁷ são positivos os valores de *yaw*, *pitch* e *roll*, respectivamente, quando vira-se a cabeça para esquerda, quando olha-se para baixo e quando deita-se à cabeça em direção ao ombro direito.

2.2 Utilização de MIDI 14 bits: MSB e LSB

Para aumentar a resolução angular do dispositivo de rastreamento, foi adotado o MIDI 14 bits. A criação de mensagens MIDI de 14 bits consiste basicamente da utilização de duas mensagens de 7 bits, obtendo-se $2^{14} = 16.384$ incrementos em vez dos tradicionais 128 incrementos do 7 bits (0 + 127). Utiliza-se o *Most Significant Byte* (MSB)⁸ e o *Least Significant Byte* (LSB) que são encontrados a partir de algumas operações binárias [11]. O desenvolvimento desse cálculo é baseado no que consta no artigo do projeto original por Romanov *et al.* [8]. O entendimento desse procedimento se faz necessário pois para criar valores de ângulo a partir dos dados do dispositivo o conhecimento do caminho inverso é necessário.

Para converter os valores angulares fornecidos pelo sensor em duas mensagens de 7 bits é necessário primeiro multiplicar esse número pelo fator $2^{14}/360$, em que 2^{14} é quantidade de valores em 14 bits e 360 a amplitude angular desejada. Deve-se então arredondar esse valor para que ele seja inteiro. Em consequente, ele é convertido para notação binária para se encontrar o MSB e o LSB da seguinte forma:

$$\text{MSB}_{7\text{bit}} = (v_{14\text{bit}} \gg 7) \& 0111\ 1111_2 \quad (1)$$

e

$$\text{LSB}_{7\text{bit}} = v_{14\text{bit}} \& 0111\ 1111_2, \quad (2)$$

em que $v_{14\text{bit}}$ representa o valor angular já no formato binário de 14 bits, o subíndice $\{\cdot\}_2$ indica que é um número binário, \gg é a operação binária de *bitwise right shift* (ou deslocamento de bits para direita) e “&” é a operação binária

⁷Todavia, isso pode ser diferente dependendo das convenções de cada laboratório.

⁸MSB define o byte *mais significativa* e LSB byte *menos significativa* — em ambos um octeto de bits. Encontra-se também na literatura *msb* e *lsb* (em minúsculo) para *most* e *least significant bit*, respectivamente. Lembrando que bit significa *binary digit* (0 ou 1) e que um byte é composto por oito (8) bits.

AND⁹. Basicamente, a operação “&” compara um mesmo bit de dois diferentes números, retornando 1 (um) quando ambos forem 1 (um). A operação *shift* serve para deslocar os bits de um número binário em um número desejado de casas (no caso deste projeto é 7). Utilizando o ângulo de 120°, faz-se o exemplo do procedimento para melhor entendimento. A saber:

- Escala-se o valor para 14 bits:
 $120 \cdot 2^{14}/360 \approx 5461,3333$;
- Arredonda-se esse valor encontrado e converte-se em número binário:
 $5461 \rightarrow 0001\ 0101\ 0101\ 0101$;
- Para encontrar o LSB, faz-se a operação da Equação (2), que irá comparar os bits do número obtido com¹⁰ (0000 0000) 0111 1111, retornando o valor 1 (um) quando ambos forem 1 (um). Isto é:

0000 0000 0111 1111 \Rightarrow Ref.

0001 0101 0101 0101 \Rightarrow 5461

0000 0000 0101 0101 \Rightarrow Result. LSB

- Para encontrar o MSB, faz-se a operação de *shift* no valor inicial¹¹,

0001 0101 0101 0101 \Rightarrow 5461

0000 0000 0010 1010 1010 1010
bits inseridos orig. deslocados descartados

Realiza-se então novamente a comparação:

0000 0000 0111 1111 \Rightarrow Ref.

0000 0000 0010 1010 \Rightarrow 5461 com *shift*

0000 0000 0010 1010 \Rightarrow Result. MSB

A partir desse cálculo são obtidos, então, em valores decimais: LSB = 85 e MSB = 42. É interessante salientar que o número de referência (0111 1111) da operação AND é o valor 127, ou seja, o valor máximo para 7 bits, fazendo então com que os valores de MSB e LSB estejam

⁹As duas operações binárias realizadas nessa etapa são explicadas em detalhe no livro *Sistemas Digitais: princípios e aplicações* por Tocci, Widmer e Moss [12].

¹⁰Nesse caso, já que um número tem 16 bits e o outro apenas 8 bits, considera-se que à esquerda do número com 8 bits todas as posições são 0 (zero).

¹¹Desloca-se o número para direita e à esquerda é completado com zeros.

compreendidos nesse intervalo, pois tudo a partir do oitavo bit irá resultar 0 (zero) depois da operação binária.

Para encontrar (ou recuperar) os valores angulares, basta fazer o procedimento inverso. Devido ao uso do sistema binário, a operação de *shift* para direita resulta na divisão por 2 (dois) [12], logo, fazendo-se 7 (sete) deslocamentos, tem-se a divisão do valor por 128. Assim, os cálculos necessário são:

- $128 \cdot 42 + 85 = 5461$;
- Revertendo o fator de escala:
 $(5461 \cdot 360) / 2^{14} \approx 119,992675^\circ$; e
- Dif.: $120 - 119,992675 \approx 0,007325^\circ$.

No entanto, adicionalmente, no projeto original a intenção era ter os valores centrados em 0 (zero), ou seja, no intervalo $(-180, 180)^{12}$ e, por isso, o cálculo de mensagens MIDI para valores angulares ganha uma etapa adicional. Com isso,

$$\theta = \left[\left(\frac{128 \cdot \text{MSB} + \text{LSB}}{2^{14} - 1} \right) - 0,5 \right] \cdot 360, \quad (3)$$

sendo que θ é um ângulo qualquer (as outras variáveis já foram definidas). Nesse caso, a subtração de 0,5 corresponde justamente ao processo de centrar os valores em torno de 0 (zero).

A escolha da escolha de 14 bits em vez de 7 bits se deve a resolução obtida. Considerado-se 360 graus, 7 bits resultaria em $360/2^7 \approx 2,81^\circ$, excedendo *Limiar Diferencial Observável* (LDO ou *Just-Noticeable Difference*, JND) para discernimento de fontes no espaço, que é aproximadamente $0,97^\circ$ para o plano horizontal e $3,65^\circ$ para o plano vertical (como estudado por Perrott e Saberi [13]). Logo, utilizando-se de 14 bits tem-se $360/2^{14} \approx 0,02^\circ$, um valor de resolução suficientemente maior.

3. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados detalhes sobre a montagem do *head-tracker*, do projeto original para a versão da UFSM. Ademais, inclui a descrição do *hardware* e de alguns testes subjetivos realizados com ele.

¹²Notação de intervalo aberto e fechado, o parêntese (demonstra que -180 não está incluso, enquanto o colchete] indica que 180 está incluso.

3.1 Cadeias de reprodução e de medição

Este projeto teve como objetivo final desenvolver duas cadeias biauriculares:

- reprodução e
- medição/gravação.

A ideia do primeiro caso é ter um sistema em que a pessoa — utilizando um *headphone* com o *head-tracker* fixado nele — fizesse movimentos e, a partir da utilização de um banco de dados de HRTFs e dos dados fornecidos pela dispositivo de rastreamento, se criassem áudios biauriculares¹³ correspondentes ao movimento, sendo ainda apresentados simultaneamente para o sujeito. O segundo caso consistiu em desenvolver uma cadeia de medição de HRTFs utilizando um *manequim* (como o HATS da Brüel & Kjær [14], por exemplo) em que o *head-tracker* atua como aparato determinante dos ângulos de medição. As duas cadeias propostas podem ser visualizadas, respectivamente, nas Figuras 2 e 3.

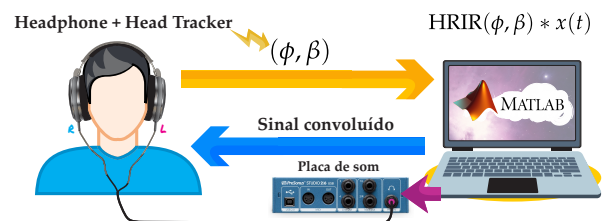


Figura 2: Representação esquemática da cadeia de reprodução implementada.

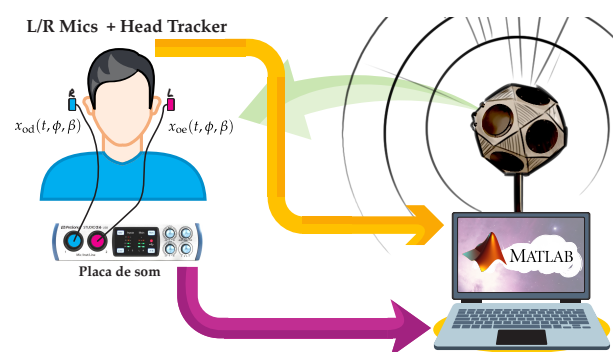


Figura 3: Representação esquemática da cadeia de medição implementada.

3.2 Arduino e descrição do projeto original

Como supracitado, o objetivo do projeto desenvolvido na Universidade de Graz era criar um instrumento de rastreamento MIDI e, para isso, foram utilizados códigos baseados no pro-

¹³Códigos desenvolvidos em Matlab.

jeto HIDUINO¹⁴ [15, 16]. Essa implementação fornece exemplos de códigos, documentação e *firmware*¹⁵ para criar um instrumento MIDI *plug-and-play*¹⁶ a partir de um MCU ATmega16u2 ou ATmega8u2 (*Microcontroller Unit*, citado nesse trabalho também apenas como *chip*). Esse tipo de *chip* é usualmente utilizado para controle da porta USB nativa de placas Arduino, porém, geralmente, os *chips* responsáveis pelo processamento do código dentro do Arduino são do tipo ATmega328 ou similares, veja a Tabela 1.

Para a utilização de um *firmware* de HIDUINO é necessário ter um sistema com dois *chips*, sendo um deles responsável para o processamento dos dados e outro responsável pela conexão com a porta USB+MIDI. Este por sua vez será reprogramado, sendo importante ressaltar que não é possível utilizar um *firmware* de HIDUINO com sistemas que possuam apenas uma MCU. As três peças utilizadas no projeto original podem ser visualizadas na Figura 4. Um alternativa seria o uso de outra biblioteca como a USBMIDI Library [17], por exemplo.

O sensor Adafruit BNO055 [18] contém um giroscópio triaxial de 16 bits (com alcance de $\pm 2000^\circ$ por segundo), um acelerômetro triaxial de 14 bits, um sensor geomagnético e um *chip* MCU Cortex M0+ (de 32 bits), como pode ser observado na Figura 5. A taxa de atualização é de 100 Hz, podendo ser entregue em diferentes formatos, escolhidos a partir de linhas de código. Observe na Figura 6 a comparação entre os tamanhos do Arduino Uno (provavelmente o mais popular da série) e o Arduino Pro Mini.

O MCU é conectado ao sensor via I²C e realiza o processamento dos dados a partir do código desenvolvido. Dessa maneira, fornece mensagens MIDI CC (*Control Change* ou ainda conhecida

como *Continuous Control*) para o computador, geradas com a utilização da biblioteca MIDI.

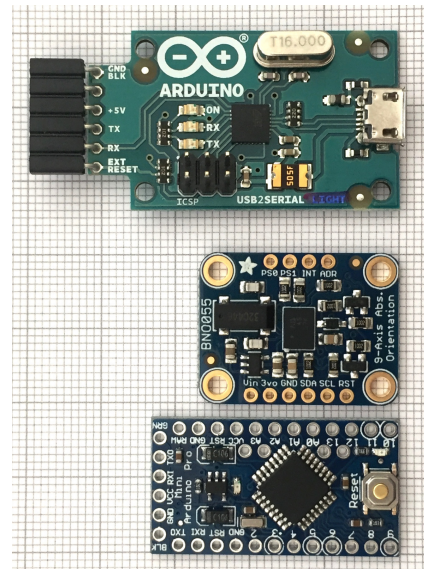


Figura 4: Peças utilizadas no projeto original, de cima para baixo: Arduino USB2 Serial Micro (24 mm × 42 mm), sensor Adafruit BNO055 (20 mm × 27 mm) e Arduino Pro Mini (18 mm × 33 mm), retirado de Romanov *et al.* [8].

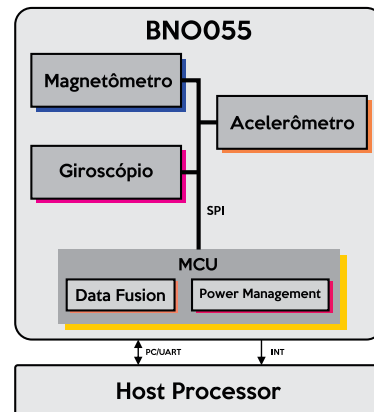


Figura 5: Arquitetura simplificada do elemento sensor BNO055 (adaptado de Guadalupi [18]).

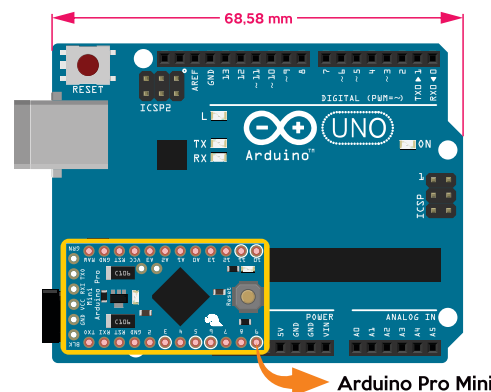


Figura 6: Comparação entre Arduino Uno e Arduino Pro Mini (veja demais dados técnicos comparativos na Tabela 1).

¹⁴O HIDUINO refere-se ao nome *Human Interface Device* (HID). Ele oferece uma porta USB-MIDI real e não uma conversão serial como os *software* LoopBe1 no Windows e/ou IAC no MacOS. Está disponível em <https://github.com/ddiakopoulos/hiduino>.

¹⁵*Firmware* é uma classe específica de *software* que fornece controle de baixo nível para o *hardware* específico, isto é, um *software* que é embarcado no *hardware*.

¹⁶Dispositivos que dispensam a utilização de *drivers* adicionais para funcionar.

O Arduino Pro Mini (ATmega328) tem o objetivo de ser pequeno e compacto, logo, essa versão não possui portas USB nativas, tornando necessário então conectá-lo a um conversor USB. Nesse caso, o Arduino USB2Serial Micro, que possui nativamente uma porta USB e um MCU ATmega16u2, pode ser usado para fazer a comunicação entre o *chip* principal e o computador. É então possível realizar o procedimento de reprogramá-lo com um *firmware* de HIDUINO para ser reconhecido pelo computador como um dispositivo MIDI *plug-and-play*. O Arduino Nano (similar ao Pro Mini), embora tenha uma porta de comunicação USB nativamente, ainda necessitaria do módulo USB2Serial para que fosse *plug-and-play*. Além disso, o tamanho físico do Nano é maior do que o Pro Mini.

A vantagem de ter o aparato funcionando como um dispositivo MIDI é porque dessa maneira tem-se compatibilidade com várias DAWs. Isso possibilita a utilização dele com *plug-ins* de áudio, como por exemplo, de Ambisonics, AmbiX [21–23] ou o SPARTA [24, 25], que permitem criar, editar e reproduzir faixas de áudio tridimensionais. Ademais, sabendo como as mensagens MIDI foram criadas, é possível convertê-las em valores angulares (em graus), de forma que elas possam ser utilizadas em códigos computacionais desenvolvidos em Matlab [26] (e/ou outros *software*/línguas).

Cabe aqui salientar que a família de placas Arduino e Arduino *compatible* é grande, tendo aplicações em áudio, acústica e vibrações com aquisição de sinais analógicos (com as placas Uno, Due [27] e Teensy 3.6 [28], por exemplo) e digitais (com as placas Zero, MKR1000 [29] e Teensy 4.0 [20], por exemplo), veja a Tabela 1. Os sites Adafruit [30] e Sparkfun [31] são ótimos locais para os leitores conhecerem modelos, projetos, tutoriais, circuitos e aplicações com essas placas (assim como sensores e novidades).

Como pode ser observado na Figura 7, o dispositivo conta também com uma *interface de usuário* equipada com um botão do tipo *push button* (em azul, que faz parte do processo de calibração) e de um botão DIP *switch* de 2 bits (que é responsável por escolher alguns modos de operação do dispositivo). O procedimento de calibração consiste, basicamente nos seguintes passos:

- Olhar para a posição frontal desejada e pressionar o botão *push button* por mais de um segundo; e
- Olhar para baixo e (sem ficar/estar pressionando), apertar o botão com um clique simples.

Essa calibração fica salva na memória do Arduino e a posição frontal pode ser reiniciada (*reset*) apertando (sem ficar pressionando) o botão novamente. É interessante fazer esse processo completo periodicamente — ou então toda vez que se usa o dispositivo.

Tabela 1: Especificações de diferentes modelos de placas Arduino ou Arduino *compatible* (adaptado de Arduino [19] e Stoffregen [20]).

| Name | Processor | Op./Input Volt. | CPU Speed | Analog In/Out | Dig. IO/PWM | EEPROM [kB] | SRAM [kB] | Flash [kB] | USB | UART |
|------------|--|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------|-------------|-------------|-----------|------------|---------|------|
| Micro | ATmega32U4 | 5 V / 7-12 V | 16 MHz | 12/0 | 20/7 | 1 | 2,5 | 32 | Micro | 1 |
| MKR1000 | SAMD21 Cortex-M0+ | 3,3 V / 5V | 48MHz | 7/1 | 8/4 | – | 32 | 256 | Micro | 1 |
| Pro | ATmega168 ATmega328P | 3,3 V / 3,35-12 V 5 V / 5-12 V | 8 MHz 16 MHz | 6/0 | 14/6 | 0,512 1 | 1 2 | 16 32 | – | 1 |
| Pro Mini | ATmega328P | 3,3 V / 3,35-12 V 5 V / 5-12 V | 8 MHz 16 MHz | 6/0 | 6/0 | 1 | 2 | 32 | – | 1 |
| Zero | ATSAMD21G18 | 3,3 V / 7-12 V | 48 MHz | 6/1 | 14/10 | – | 32 | 256 | 2 Micro | 2 |
| Uno | ATmega328P | 5 V / 7-12 V | 16 MHz | 6/0 | 14/6 | 1 | 2 | 32 | Regular | 1 |
| Due | ATSAM3X8E | 3,3 V / 7-12 V | 84 MHz | 12/2 | 54/12 | – | 96 | 512 | 2 Micro | 4 |
| Mini | ATmega328P | 5 V / 7-9 V | 16 MHz | 8/0 | 14/6 | 1 | 2 | 32 | – | – |
| Nano | ATmega168 ATmega328P | 5 V / 7-9 V | 16 MHz | 8/0 | 14/6 | 0,512 1 | 1 2 | 16 32 | Mini | 1 |
| MKRZero | SAMD21 Cortex-M0+ 32 bit ¹ | 3,3 V | 48 MHz | 7 (ADC 8/10/12 bit)/1 (DAC 10 bit) | 22/12 | No | 32 KB | 256 | 1 | 1 |
| Teensy 3.6 | NXP MK66FX1M0 ² | 3,3 V | 180 MHz | 25 (2x 13 bit)/ 2 (12 bit) | 62/22 | 4 | 256 | 1024 | Micro | 6 |
| Teensy 4.0 | NXP iMXRT1062 ³ | 3,3 V | 600 MHz | 14 (2 x 12 bit)/0 | 41/31 | 64 | 1024 | 2048 | Micro | 5 |

¹ Low-power ARM MCU; ² ARM Cortex-M4 with FPU; ³ ARM Cortex-M7 with FPU; °FPU = Floating Point Unit.

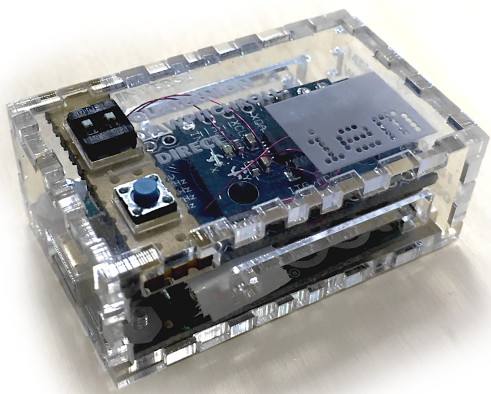


Figura 7: Protótipo da Universidade de Graz do Mr Head Tracker (adaptado de Rudrich, Zaunschirm e Romanov [7]).

Os modos de operação citados correspondem às posições das duas chaves que a peça *switch* possui. A Chave 1 é responsável por alternar o funcionamento do *head-tracker* entre modo direto (OFF) e indireto (ON) (*invSwitch*, dentro do código), sendo esses modos responsáveis por fazer o dispositivo funcionar como um *pointing device* ou para compensar a rotação do movimento realizado, respectivamente. Isso significa que, quando há um movimento, para o primeiro caso (modo direto), dentro do computador se terá um movimento correspondente no mesmo sentido e, no segundo caso (modo indireto), se terá um movimento correspondente no sentido contrário. No modo direto, por exemplo, mexer a cabeça 30° para esquerda (sentido com valores positivos) gerará um valor de +30°, no entanto, no indireto, esse mesmo movimento irá gerar um valor de -30°.

A Chave 2 é responsável por alternar a informação enviada pelo *head-tracker* entre *quaternions* (ON) e ângulos de Euler (OFF) (*quatSwitch*, dentro do código), sendo o primeiro um dado mais robusto, utilizado para processamento de localização quando o dispositivo pode estar em qualquer lugar no espaço e, o segundo, por exemplo, para a utilização do dispositivo em um lugar fixo em que a pessoa mexe apenas a cabeça.

3.3 Protótipo UFSM desenvolvido

A montagem do novo protótipo do dispositivo consistiu basicamente da utilização dos mesmos equipamentos, porém, com a dificuldade de encontrar disponível uma peça do projeto original,

a interface USB utilizada foi um conversor FTDI FT232RL [32], que tem a pinagem semelhante ao do Arduino USB2 Serial Micro e também conecta perfeitamente com o Arduino Pro Mini, sendo as três peças utilizadas apresentadas na Figura 8.

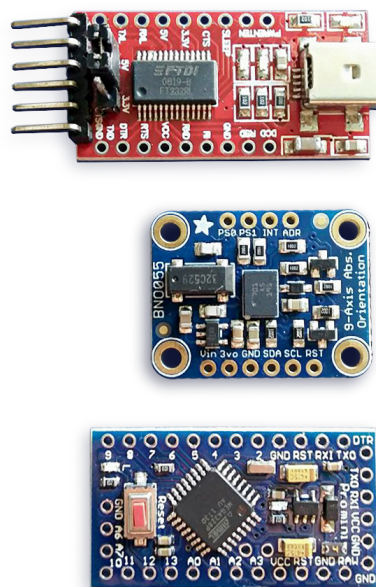


Figura 8: Hardware utilizados para a montagem do experimento, de cima para baixo: FT232RL, sensor BNO055 e Arduino Pro Mini.

Embora somente com um *hardware* de alteração do projeto original, foi encontrado o problema quanto à utilização de *firmware* de HIDUINO com apenas um *chip* para processamento, fato que, *a priori*, não era conhecido. Diferente do conversor Arduino que possui uma MCU do tipo ATmega16u2, possibilitando modificações, a placa FT232RL possui apenas um *chip* simples FTDI que serve somente como uma ponte para ligar uma placa que não possui porta USB ao computador, sem possibilidade de alteração do seu *firmware*. Ou seja, inviabiliza o funcionamento do aparelho como um dispositivo *plug-and-play*, assim, tornando-se necessária a utilização de *software* adicionais que recebam e traduzam as informações chegando pela porta USB (previamente criadas com funções da biblioteca MIDI).

Tendo em vista essa limitação, foi utilizado o Hairless MIDI [33], *software* cuja funcionalidade é organizar os dados da porta USB em mensagens MIDI. Para transmiti-las para outras aplicações, como, por exemplo, Matlab e

Pure Data (Pd) [34], se faz necessária a utilização ainda de um outro *software* que funcione como um *cabo MIDI virtual*, ou seja, que faça o computador interpretar o sistema como se de fato um instrumento MIDI estivesse conectado na porta USB e estivesse enviando suas próprias mensagens. Para esse fim, foi utilizado o LoopBe30 [35], cujas portas virtuais de entrada e saída são reconhecidas nos *software* de recepção, para que possam ser utilizadas como seria com qualquer outro dispositivo MIDI.

3.4 Montagem e utilização

Visto que conversor FTDI possui seis pinos machos já soldados, foram soldados no Arduino Pro Mini conectores fêmea para que houvesse uma conexão estável e sem maus contatos. As peças conectadas e sendo alimentadas com tensão da porta USB do computador via cabo USB mini podem ser observadas na Figura 9.

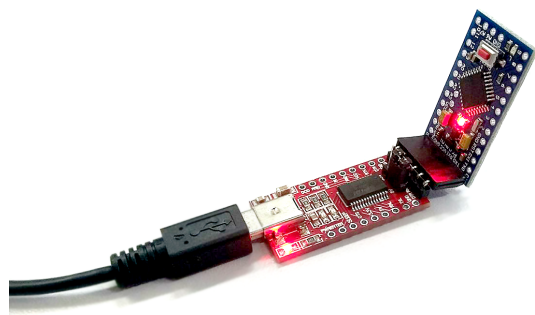


Figura 9: Arduino Pro Mini conectado ao conversor FT232RL da FTDI.

Para utilização do código disponibilizado no *website* do projeto foi necessário fazer o *download* do *software* de Arduino, além de algumas bibliotecas, sendo elas: MIDI, EEPROM, Adafruit Unified Sensor Library e também a Adafruit BNO055 Library. Após a devida instalação da IDE do Arduino, instalaram-se tais bibliotecas. Essa etapa pode ser realizada incluindo elas na pasta *libraries* dentro da pasta instalada Arduino, ou então, dentro da IDE¹⁷, acessando o menu Sketch e então Incluir biblioteca → Adicionar biblioteca .zip e escolher o arquivo .zip baixado.

Para que fosse possível utilizar o dispositivo com o *software* Hairless MIDI, foi necessá-

rio fazer uma pequena alteração no código original, em que era inicializada apenas uma conexão MIDI com o comando `MIDI.begin`, sendo na nova versão necessário inicializar também uma conexão serial com o comando `Serial.begin`, devendo, ao fim, existir a seguinte sequência do Código 1.

Código 1: Adição de comando¹⁹ para inicializar conexão serial após a inicialização da conexão MIDI.

```
MIDI.begin(MIDI_CHANNEL_OMNI);  
Serial.begin(115200);
```

A diferença é que, como as mensagens são enviadas via comunicação serial e devem ser traduzidas dentro do Hairless MIDI, essa conexão teve que ser previamente estabelecida. No caso do projeto original, como o dispositivo se comporta igual a um dispositivo MIDI por conta do *firmware* de HIDUINO, tal conexão não necessita ser feita visto que as mensagens enviadas, mesmo sendo elas enviadas serialmente, já estão organizadas de acordo com o protocolo MIDI.

Depois disso, para transferir o *sketch*¹⁸ fornecido¹⁹ na página *online* do projeto (com a adaptação supracitada já realizada), foi selecionada (no *software* do Arduino, menu Ferramentas) a placa “Arduino Pro ou Pro Mini”, o processador nesse caso é o ATmega328P (5 V, 16 MHz). A porta serial é reconhecida quando o conversor FT232RL (junto ao Arduino) é conectado ao computador, sendo nesse caso a porta COM3 (lembrando que é necessário clicar no botão de carregar). Essas configurações podem ser visualizadas na Figura 10.

Após ter sido realizada essa etapa, foi feita a conexão das peças de acordo com o diagrama apresentado na Figura 11, sendo elas devidamente soldadas.

É extremamente importante comentar que o dispositivo só começa a enviar mensagens após uma calibração ter sido efetuada. Para esta etapa é interessante já ter o *software* Hairless MIDI aberto (tela de *debug*), de forma que é possível verificar se o aparelho começa, de fato, a

¹⁸Termo utilizado também para se referir a um código (ou projeto) de Arduino.

¹⁹MrHeadTrackerBNO055Switchable.ino.

¹⁷Integrated Development Environment.

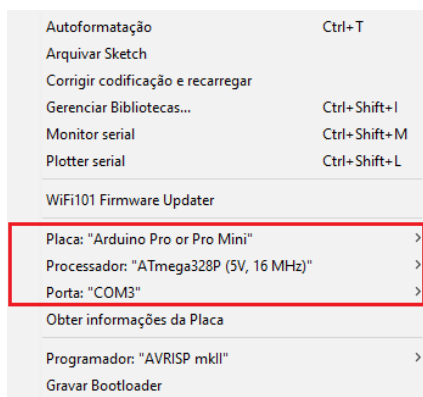


Figura 10: Configurações no software do IDE para transferência do sketch para o Arduino Pro Mini.

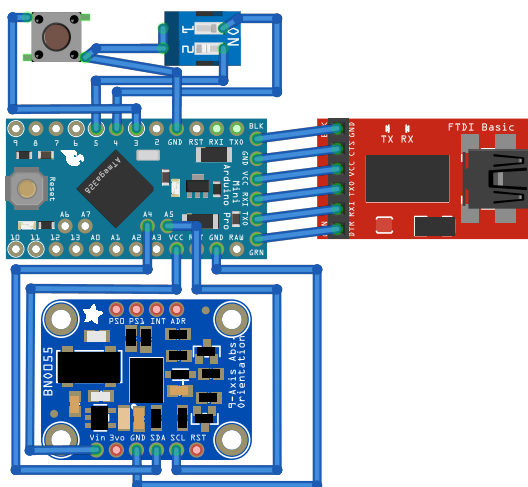


Figura 11: Diagrama de conexão dos hardware do head-tracker.

enviar as mensagens. Após aberto, é possível perceber que o Hairless MIDI não possui muitas configurações, como mostrado na Figura 12. Entretanto, é essencial deixar ativada a caixa Serial <-> MIDI Bridge ON. É de suma importância ajustar o Baudrate²⁰ (em File → Preferences...) correspondentemente ao utilizado na rotina do Arduino. Configura-se também no menu Serial Port a porta COM associada ao dispositivo (assim como na IDE do Arduino).

A tela de debug também serve para verificar se o dispositivo está enviando dados no formato de Euler ou em Quaternions. No primeiro caso, aparecem mensagens apenas dos controladores 16, 48, 17, 49, 18 e 50. No segundo caso, aparecem também dos controladores 19 e 51. Em MIDI Out, deve-se configurar uma das portas do dispositivo MIDI virtual, sendo neste caso do LoopBe30.

²⁰Baudrate é o número de vezes em um segundo que um sinal em um canal de comunicação muda.

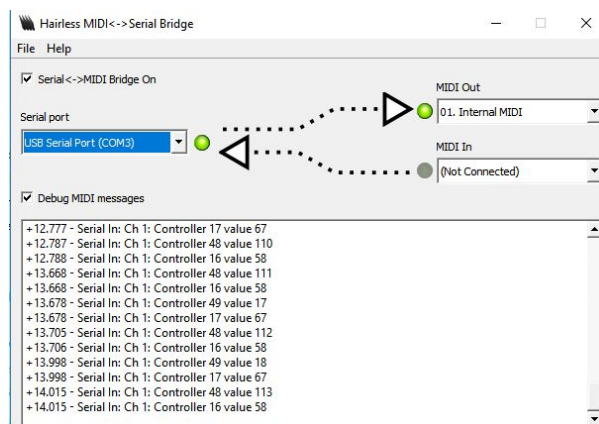


Figura 12: Interface do software Hairless MIDI.

É importante salientar que o LoopBe30 possui um detector de feedback MIDI, ou seja, ele reconhece quando uma mensagem MIDI fica “presa” entre a entrada e saída do dispositivo virtual (semelhante ao efeito de microfonia), assim, usa da função *mute* nas portas MIDI para que o computador não fique lento. Com o sensor BNO055, essa situação acontece pois a taxa de *uptade* dele é de 100 Hz, provavelmente ultrapassando o limite de memória que as especificações MIDI aceitam por segundo, acionando assim o mecanismo de defesa mesmo que não esteja acontecendo um *feedback* real. Dessa forma, foi necessário desativar esse detector, porém certificando-se que o fenômeno não estava de fato acontecendo. A versão comercial LoopBe30 teve de ser utilizada neste projeto, visto que a versão gratuita, o LoopBe1, não possui essa função de desabilitar o detector de *feedback* [35], sendo inviável na utilização com o sensor BNO055.

Para utilizar o dispositivo com o Matlab, existem algumas funções específicas do software para comunicação com instrumentos MIDI, sendo elas:

- **mididevinfo**: mostra todos os instrumentos MIDI e portas (*in/out*) disponíveis;
- **mididevice**: permite selecionar e atribuir à uma variável o dispositivo MIDI disponível desejado; e
- **midireceive**: permite receber as mensagens MIDI do dispositivo selecionado.

Munido dessas funções foi possível fazer a leitura das mensagens enviadas pelo head-tracker e então gerar valores de ângulo a partir dos valores MIDI recebidos utilizando a Equação (3).

A partir dos diagramas apresentados nas Figuras 13 e 14 é possível observar a diferença entre as duas cadeias de utilização do *head-tracker*, isto é, projeto do IEM e o projeto da UFSM. Neste artigo apenas os experimentos com a cadeia de reprodução serão reportados, aqueles com a cadeia de gravação e demais pormenores do projeto podem ser verificados na monografia de Bom [36].

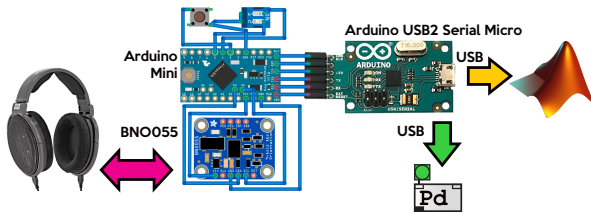


Figura 13: Diagrama da utilização do *head-tracker* com sistema original IEM.

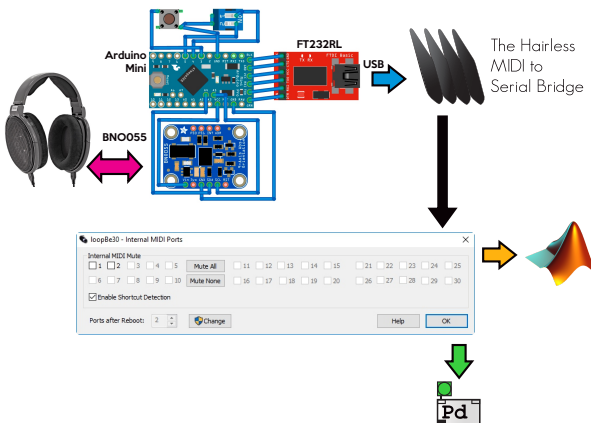


Figura 14: Diagrama da utilização do *head-tracker* com sistema da UFSM.

3.5 Testes subjetivos utilizando o dispositivo

Com o objetivo de avaliar o funcionamento do dispositivo em conjunto com os códigos computacionais desenvolvidos, foram conduzidos testes subjetivos²¹ utilizando uma versão simplificada da cadeia de reprodução. Essa abordagem permitiu também aprofundar a compreensão de alguns detalhes e do comportamento do sistema. Todos os testes foram de localização de fontes virtuais (geradas nos códigos desenvolvidos em Matlab) utilizando um banco de dados de HRTFs [37].

²¹Eles não foram realizados no mesmo dia e não necessariamente pelos mesmos sujeitos. Além disso, não foi averiguada a condição auditiva dos voluntários. Os testes foram realizados dentro do contexto da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia Acústica da UFSM.

A ideia geral do teste preliminar, denominado aqui como Teste 1, foi apresentar ao sujeito áudios espaciais referentes a oito posições de fonte, as quais eram indicadas em uma folha de teste e eram as únicas opções possíveis de marcação do participante que, por sua vez, deveria fazê-la de acordo com a sua percepção para cada reprodução do áudio — sendo a ilustração utilizada uma versão impressa da imagem apresentada na Figura 15. Esse teste teve a finalidade de ambientação do voluntário, sendo que o *head-tracker* não foi utilizado.

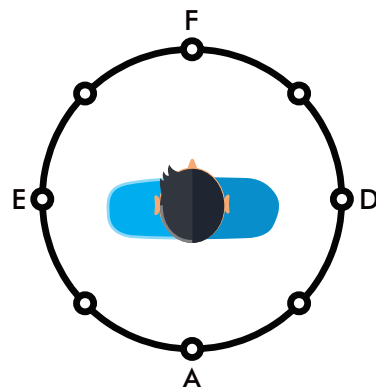


Figura 15: Imagem apresentada aos sujeitos para localizar a fonte sonora em sua volta.

Explorando unicamente o plano horizontal, com movimentos em torno do eixo Z (azimute ou *yaw*), as posições foram diversificadas, enquanto a elevação foi mantida constante (em zero). Além disso, foi utilizado um sistema de dicas sobre tais posições: para as três primeiras reproduções, a dica foi de que a fonte poderia estar apenas na parte frontal, assim como as próximas três seriam apenas na parte traseira e as últimas três poderiam estar em qualquer uma das posições. Todos os casos poderiam incluir as posições de 90° e 270°, sendo elas, respectivamente, esquerda e direita.

Na sequência, foi elaborado um sistema com o *head-tracker* montado em uma *jog wheel* — *mesa girante* (ou *turntable*) de uma controladora MIDI²² geralmente utilizada para discotecagem — de forma a facilitar a movimentação livre (angular) do dispositivo *head-tracker*. Foram colocadas algumas demarcações de referência (em azul) nos ângulos 0°, 90°, 180° e 270°, para facilitar a localização espacial, observe a Figura 16.

²²As mensagens nativas da *jog wheel* não foram utilizadas,

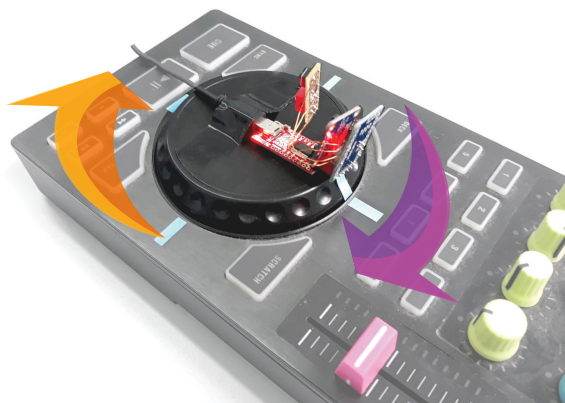


Figura 16: *Head-tracker* montado na *jog wheel* (mesa girante), voltado para a posição 0°.

Uma etapa intermediária foi desenvolvida (apenas para teste interno), permitindo gerar o posicionamento de fontes sonoras no espaço conforme a posição do *head-tracker* na *jog wheel*. Nesse caso, era possível colocar um áudio em qualquer ângulo azimutal (de uma mesma elevação e respeitando a disponibilidade do banco de HRTF) e ouvi-lo na sequência.

Numa segunda avaliação (Teste 2), o voluntário ouvia o áudio espacial e, diferente do Teste 1, deveria indicar a posição da fonte utilizando o *head-tracker* montado na *jog wheel* (sendo preservadas ainda as dicas de hemisférios). Todavia, dessa vez, as opções não eram discretizadas, podendo os sujeitos posicionar o dispositivo em qualquer ângulo desejado (conforme a percepção promovida).

Em todos os testes foi utilizado um *headphone* Sennheiser HD-650, cujo o filtro de compensação (equalização) foi obtido no banco de dados de HRTFs de Fabian [37, 38]. Um sinal musical foi escolhido para aplicação, sendo o volume geral do computador ajustado em 70% e do Matlab em 22% no *mixer* do computador (conferindo um volume *confortável*). No Teste 1 o áudio foi reproduzido com a função **sound** do Matlab que, posteriormente, foi substituída pela função **play** do ITA Toolbox²³ que demonstrou maior controle. Ambos os testes contaram com 20 participantes, sendo eles, em sua maioria, alunos do curso de Engenharia Acústica da UFSM [40].

ele serviu apenas como base girante.

²³*Toolbox* de acústica para Matlab desenvolvido na Universidade de Aachen na Alemanha [39].

Finalmente, a partir dos resultados obtidos nos Testes 1 e 2 — que demonstraram algumas limitações em evidenciar o funcionamento do sistema utilizando o *head-tracker* devido a fenômenos acústicos (ou de audição²⁴) — foi concebido e aplicado um terceiro teste, denominado Teste Final. O objetivo desse último teste foi minimizar erros relacionados a tais fenômenos (aos quais ambos testes anteriores estavam mais suscetíveis) que na verdade não estavam associados ao funcionamento do dispositivo em si (junto às rotinas desenvolvidas), podendo assim mascarar o resultado que indicaria o desempenho correto do sistema.

A ideia desse teste foi apresentar para o sujeito a fonte em uma determinada posição, de forma que, assim como no Teste 2, ele deveria descobrir sua localização, porém, dessa vez, apontar virando-se em um banco giratório, utilizando o *head-tracker* fixado no *headphone* (observe a Figura 17). Após o primeiro movimento, o sujeito ouvia a reprodução da fonte fixada na mesma posição, que seria calculada compensando a rotação realizada por ele, sendo o procedimento repetido até que o participante tivesse a sensação de estar plenamente de frente para a fonte sonora.

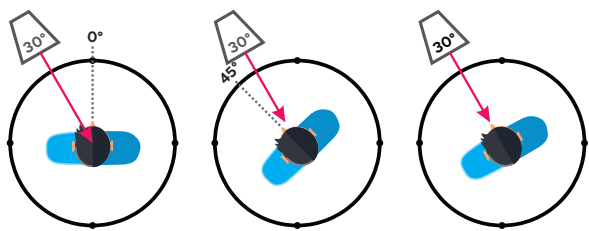


Figura 17: Sujeito utilizando o *headphone* com o *head-tracker* fixado para o Teste Final (em uma sala de aula comum).

Um exemplo prático é apresentado para melhor entendimento: o sujeito virado para a posição frontal (0° de azimute) escuta com o *headphone* a fonte ser reproduzida na posição 30° (à esquerda), e então, após a reprodução cessar, o

²⁴Serão abordados na seção seguinte.

sujeito se move na tentativa de ficar de frente para a fonte sonora e atinge a posição 45°. Como a fonte se mantém na mesma posição e a rotação do sujeito é compensada na implementação do código, a próxima reprodução da fonte via *headphone* será em 345° (15° à direita). Após o sinal cessar novamente, o sujeito se vira para a posição correta e, ao final da reprodução nesta posição, confirma estar de frente para a fonte. A situação é ilustrada na Figura 18.



(a) Reprodução 1 do Teste Final. (b) Reprodução 2 do Teste Final. (c) Reprodução 3 do Teste Final.

Figura 18: Exemplificação do Teste Final da cadeia de reprodução (fonte sonora em 30° de azimuth).

O teste consistiu de possibilidades (e tentativas) ilimitadas para o voluntários localizar as posições de fonte, de forma que a taxa de acertos (ao final) fosse aprimorada. Como esse processo eventualmente poderia ser demorado, foi escolhido o número de três posições (60°, 230° e 330°) para cada sujeito.

Nesse teste o *headphone*, seu ajuste de volume e a maneira de reprodução foram idênticos ao do Teste 2. Para cada participante era solicitado que sentasse voltado para uma parede específica e então era realizada a calibração do *head-tracker*. Para todos eles foi solicitado também que virassem cabeça e tronco juntos. Era realizada uma breve explicação do teste com uma ilustração no quadro negro para que compreendessem de maneira correta o procedimento. Ainda, era solicitado que tentassem evitar movimentos menores após estabelecerem-se em uma determinada posição após cada reprodução, pois essas poderiam significar alguma alteração no dado de orientação para geração da próxima posição de fonte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

É interessante comentar, primeiramente, que as dicas utilizadas nos testes foram motivadas pelas confusões geralmente presentes no contexto da audição espacial, sendo algumas delas bastante conhecidas e estudadas. As principais delas são a *reversão frente/costas*, que faz que a pessoa tenha impressão que uma fonte em sua frente está, na verdade, atrás (e vice-versa) [41], e o *cone de confusão*, região cônica cuja a localização é dificultada em torno de 90° e 270°, devido às ambiguidades nas pistas que o cérebro utiliza para localizar uma fonte no espaço [42]. Considerando que o propósito primordial dos testes era destacar o funcionamento adequado do *head-tracker* (com os códigos desenvolvidos), tais erros devem ser negligenciados. Ainda que tenham sido reduzidos, restringindo a área de resposta dos participantes com base nas dicas fornecidas.

O Teste 1 (ambientação preliminar) gerou os resultados apresentados na Tabela 2, em que as linhas representam as marcações em uma determinada posição da folha de teste e as colunas representam o número de vezes que a reprodução com a fonte em uma determinada posição foi marcada nas posições disponíveis na folha. É importante salientar que uma das posições de reprodução era repetida, totalizando em um número maior de colunas do que linhas.

Tabela 2: Resultados obtidos no Teste 1 (ambientação preliminar) de localização de fonte (utilizando a Figura 15 e as dicas) — sem uso do *head-tracker*.

| | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|----|------|----|-----|------|------|------|------|------|------|
| | 46° | 0° | 90° | 270° | 134° | 180° | 314° | 226° | 180° |
| P1 | 46° | 13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| P2 | 0° | 1 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 |
| P3 | 90° | 6 | 0 | 20 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| P4 | 270° | 0 | 1 | 0 | 11 | 0 | 0 | 10 | 14 |
| P5 | 134° | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 2 | 0 | 4 |
| P6 | 180° | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 |
| P7 | 314° | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 2 |
| P8 | 226° | 0 | 1 | 0 | 9 | 1 | 0 | 4 | 4 |
| P9 | 180° | — | — | — | — | — | — | — | 3 |

Como a diagonal principal é o número de acertos (células em azul e rosa), pode-se observar com evidência que a utilização das dicas aumentou significativamente o número de acertos (células em azul) quando comparado às três últimas reproduções (células em rosa) em que a fonte poderia estar em qualquer uma das oito posições. Observando a tabela, nota-se que o pior caso das seis primeiras reproduções obteve apenas 11 acertos, e o melhor caso das três últimas reproduções apenas 6 (seis) acertos. Em especial, é interessante comparar a reprodução da fonte em 180° que, para a etapa com dicas obteve 18 acertos, porém na etapa sem dicas obteve apenas 3 (três). Esses resultados demonstraram que, de fato, isolando as possibilidades de respostas dos sujeitos, tem-se um menor erro associado às confusões. A mudança para um maior número de acertos também indica que o sistema de rastreamento estava funcionando de maneira adequada com os códigos implementados.

No Teste 2, como não havia um número discreto de opções de marcações, gerou-se uma *nuvem de resultados* em torno das posições reais da fonte que, em muitos casos, foi bastante dispersa pois os sujeitos, em grande parte, aparentaram não levar em consideração as dicas como no primeiro teste. Os resultados gráficos para nove posições são mostrados na Figura 19. Os pontos em vermelho representam a posição real da fonte e os pontos azuis, as respostas dos sujeitos.

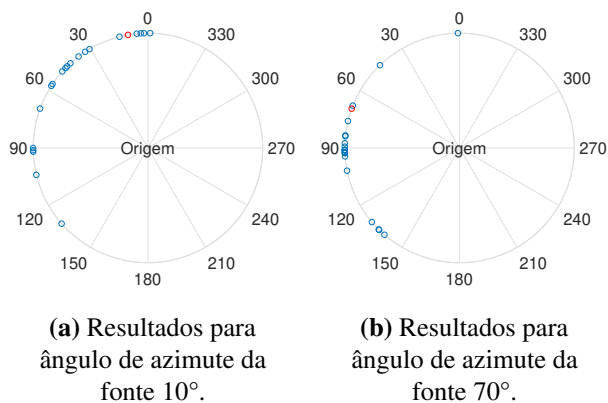


Figura 19: Resultados obtidos no Teste 2 de localização de fonte utilizando o *head-tracker* (Parte 1/2).

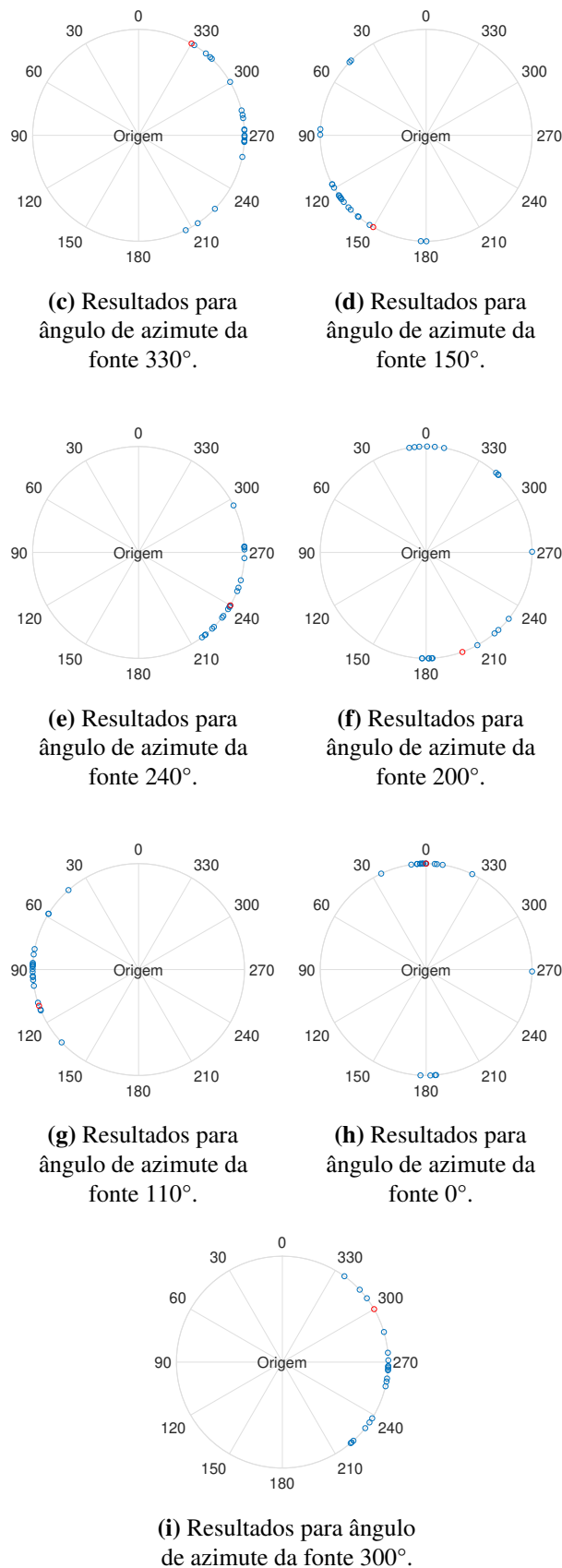


Figura 19: Resultados obtidos no Teste 2 de localização de fonte utilizando o *head-tracker* (Parte 2/2).

Com a análise de resultados²⁵ (do Teste 2) fica evidente que os sujeitos tiveram mais dificuldade em localizar a posição exata da fonte, sendo isso possivelmente associado à falta de opções discretas de marcação (se comparado com o Teste 1). Também deve-se comentar sobre a possível aparição de outro fenômeno acústico que pode acontecer na audição espacial, o *erro de localização* (ou *localization blur*) [43]. Diferente das confusões que tem a ver com a ambiguidade das pistas que o cérebro utiliza para localização (reversão frente/costas e cone de confusão que, por sua vez, podem ter sido influentes neste teste também), ele está associado à sensibilidade espacial do sistema auditivo, ou seja, à capacidade de discriminar²⁶ ou não uma fonte em dois pontos relativamente próximos. Dessa maneira, isso pode ter feito com que os sujeitos não tenham conseguido definir exatamente uma posição para a fonte, podendo julgar que ela estava, por exemplo, em uma região entre $\pm 10^\circ$ da posição verdadeira. Esse comportamento pode ser verificado em alguns dos gráficos em que existem várias respostas muito próximas da posição real da fonte.

Para observar a *nuvem de resultados*, quatro testes de normalidade foram aplicados para cada ângulo, estes testes são indicados geralmente para conjuntos com poucas observações, são eles: Anderson-Darling (*adtest*) [44], Lilliefors (*lillietest*) [45], Jarque-Bera (*jbtest*) [46] e Shapiro-Wilk (*swtest*) [47]. A hipótese nula ($H=0$) indica que o teste não pode rejeitar a hipótese de que a distribuição seja Gaussiana (ou Normal), com uma certa significância (95% neste caso). Por simplicidade, apenas os resultados dos testes estão mostrados na Figura 20. Por exemplo, para o caso (e) — 240° — da Figura 19 todos os quatro testes *concordam*, ao apresentar $H=0$. Não ter distribuição normal não indica erro, mas que o conjunto possui outra distribuição ou ainda que o conjunto deve ter mais observações para uma conclusão aprimorada acerca da média (\bar{x}) e variância (σ_x^2). Além

disso, como pode ser verificado nos casos (f) e (h) — 200° e 0° — existiu reversão frente/costas, como pode ser corroborado pela variância alta na Tabela 3, fazendo com que alguns testes obtivessem $H=1$. No caso (h), por exemplo, removendo reversões e *outliers*²⁷, todos os testes obtém $H=0$ (nesse caso o conjunto foi reduzido para 13 observações).

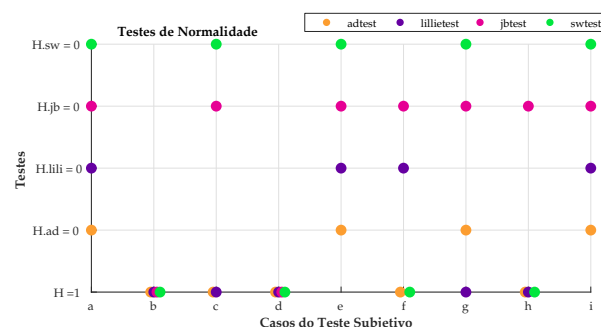


Figura 20: Testes de normalidade nos dados da Figura 19 (a) até (i) para o Teste 2.

Para avaliar as respostas com valores numéricos, foi gerada também a Tabela 3 com a *média aritmética* das respostas, variância, mediana, melhor acerto, assim como o *Mean Absolute Error* (MAE ou erro médio absoluto), calculado a partir de

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - x_t|, \quad (4)$$

em que N é o número total de valores medidos (ou observações), x_i os valores medidos e x_t o valor real (ou correto). Os valores foram arredondados para ficar sem casas decimais.

Tabela 3: Valores comparativos de desempenho para o Teste 2, casos da Figura 19 (a) até (i).

| Valor real (°) | 10 | 70 | 330 | 150 | 240 | 200 | 110 | 0 | 300 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Caso | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) | (i) |
| Média (°) | 50 | 91 | 274 | 104 | 247 | 304 | 89 | 45 | 263 |
| Variância (°) | 37 | 32 | 33 | 74 | 22 | 107 | 20 | 70 | 30 |
| Mediana (°) | 45 | 91 | 271 | 125 | 240 | 317 | 89 | 5 | 266 |
| MAE (°) | 43 | 31 | 56 | 49 | 18 | 111 | 24 | 45 | 42 |
| Melhor acerto (°) | 14 | 68 | 328 | 148 | 240 | 209 | 108 | 0 | 307 |

²⁵Com figuras de vetoriais é possível realizar o *zoom* para observar melhor os detalhes nos gráficos.

²⁶Por isso utiliza-se o termo *blur*, como se estivesse *borrado*, *nublado* ou ainda *embaçado*.

²⁷Valor aberrante ou valor atípico, apresentando um grande afastamento em relação aos demais do conjunto.

É importante lembrar que a avaliação foi apenas auditiva, com isso, nenhuma pista visual pôde ajudar o sistema de localização. Da perspectiva de análise dos resultados, os gráficos, testes de normalidade, média, variância, mediana e MAE são complementares, visto que os parâmetros isoladamente podem levar a conclusões errôneas. Da perspectiva do funcionamento do protótipo, observa-se um ótimo acordo com a teoria e expectativas de resultados.

Outro ponto a ser ressaltado é que, da maneira como o *head-tracker* estava preso à *jog wheel*, que basicamente era com fitas adesivas, alguma força era exercida sobre tal sistema, fazendo com que ele se movimentasse involuntariamente. Dessa forma, percebeu-se que ao fim de alguns testes, mesmo com o dispositivo voltado para a fita azul referente à posição de 0° , o valor de ângulo lido no computador era diferente, podendo chegar até a 5° , fazendo-se concluir que, possivelmente, a força do cabo USB estivesse alterando a posição original de fixação do *head-tracker*.

Para investigar esse comportamento, foi realizada uma trajetória com o *head-tracker* montado no *jog wheel* (da mesma forma que durante os testes), e os dados angulares foram registrados para processamento posterior. Os pontos de partida e de chegada foram ambos fixados em 0° , com a fita azul como referência. Ao fim desse teste, pode-se notar que, devido à força exercida pelo cabo, a posição do *head-tracker* era levemente alterada, podendo causar, então, uma deriva (*offset*) nos valores armazenados no teste de cada sujeito — ainda que fosse realizada a calibração da posição frontal para todos participantes. O resultado de uma dessas trajetórias observadas pode ser visto na Figura 21, em que, ao começo do percurso, o valor alinhado com a fita azul era de $0,27^\circ$ e, ao fim, de $3,68^\circ$. Lembrando que este foi um problema no experimento e não no protótipo em si.

Deve-se considerar também que um estudo realizado pelos desenvolvedores originais do projeto [8] demonstrou que o dispositivo possui um *desvio padrão* (para cinco trajetórias consecutivas em torno dos três ângulos de rotação: *yaw*, *pitch*

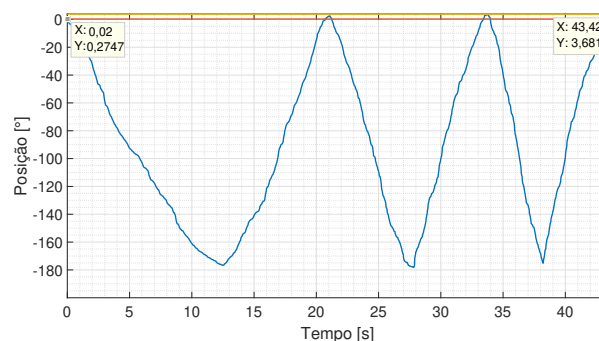


Figura 21: Trajetória do *head-tracker* montado no *jog wheel* ao longo do tempo.

e *roll*) compreendido entre $0,5^\circ$ e $2,5^\circ$. Porém, como não são apresentados estudos com trajetórias maiores no trabalho, nada garante que esse erro não possa ser maior em percursos mais extensos. Todavia, deve-se pontuar que este é um projeto de relativo baixo custo.

Os testes demonstraram que para a utilização da cadeia de reprodução de maneira realista, ou seja, sem opções discretas de marcação, algum critério a mais deveria ser utilizado para restringir as respostas dos sujeitos para diminuir os erros associados tanto às confusões de localização quanto ao *blur* — e, por esse motivo, o Teste Final foi elaborado.

Nos resultados do Teste Final, como esperado, as respostas dos 20 voluntários participantes foram muito mais próximas dos valores reais da fonte, uma vez que eles puderam restringir a possível posição da fonte após cada reprodução e eliminar ambiguidades (como nos casos de reversão frente/costas) com movimentos intermediários durante o teste. O diagrama que exibe a posição real da fonte em vermelho e as respostas dos participantes em azul é apresentado na Figura 22.

É possível notar que, excluindo alguns *outliers*, as respostas são substancialmente menos espalhadas que no Teste 2, cuja dinâmica de localização de fonte era similar ao Teste Final. Para quantificar de forma objetiva os resultados, foram calculados a média, a variância, a mediana, o erro médio absoluto (MAE) e o melhor acerto para cada posição, os dados estão apresentados na Tabela 4. Os valores entre parênteses são referentes aos cálculos **desconsiderando** os *outliers*.

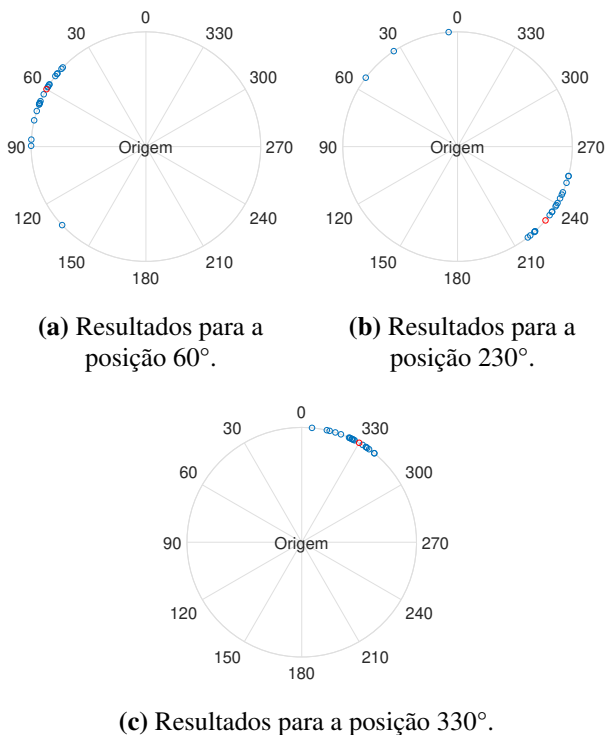


Figura 22: Resultados de localização obtidos do Teste Final.

Tabela 4: Dados extraídos do Teste Final (valores **em negrito** sem *outliers*).

| Valor real (°) | 60 | 230 | 330 |
|-------------------|------------------|--------------------|-----|
| Caso | (a) | (b) | (c) |
| Média (°) | 67 (63) | 260 (237) | 334 |
| Variância (°) | 20 (12) | 58 (12) | 9 |
| Mediana (°) | 65 (63) | 240 (239) | 334 |
| MAE (°) | 13 (10) | 34 (12) | 8 |
| Melhor acerto (°) | 63 | 234 | 328 |

Observa-se pelos resultados apresentados na tabela que as respostas para cada posição de fonte foram pouco dispersas, o que pode ser evidenciado principalmente pelos baixos valores de variância (dos casos desconsiderando os *outliers*). O erro calculado também apresentou valores relativamente baixos, porém talvez seja uma tarefa difícil eliminá-lo completamente pois provavelmente ele esteja associado ao fenômeno *blur*, ao qual testes subjetivos estão suscetíveis.

Ao comparar os valores sem *outliers* da Tabela 4 com os dados da Tabela 3 (referente ao Teste 2), é possível perceber uma melhora considerável no desempenho dos sujeitos — exceto na linha

referente ao *melhor acerto*, na qual em ambos os casos foram bem próximos do valor real da fonte. É importante salientar que os valores sem considerar os *outliers* não foram calculados para o Teste 2 pois não faria muito sentido, visto que grande parte dos dados seria desconsiderada, além de que o Teste 2 era naturalmente suscetível aos erros provenientes das confusões da audição (supramencionadas). O Teste Final, por sua vez, tinha justamente o intuito de evitar tais erros.

Similar ao Teste 2, foram realizados também para o Teste Final os testes de normalidade para as respostas com e sem os *outliers*. Os dados sem *outliers* organizados em barras também foram comparados à curva Gaussiana. Esses gráficos podem ser vistos na Figura 23.

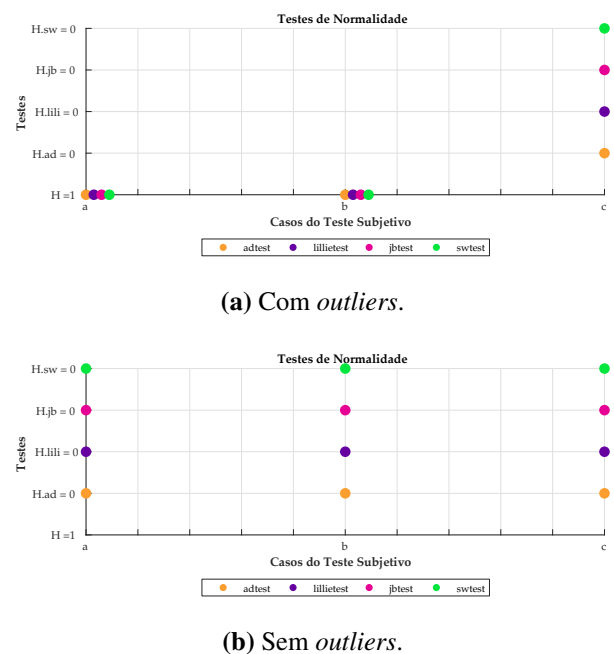


Figura 23: Testes de normalidade nos dados da Figura 22 (a) até (c) do Teste Final.

No caso desconsiderando os *outliers*, todos os testes apresentaram respostas similares, indicando que o conjunto de dados possui prova-

velmente uma distribuição normal. Isso reflete a situação de que humanos, em geral, possuem um comportamento semelhante quando submetidos às mesmas condições, fato evidenciado pela psicoacústica [1]. Todavia, para uma estabilidade estatística, mais experimentos devem ser realizados. Por fim, estes resultados corroboram para demonstrar a eficácia do rastreador construído.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um *head-tracker* (rastreador de cabeça) baseado em Arduino, desenvolvido na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que representa uma solução de baixo custo (via *hardware*) para o monitoramento da posição da cabeça em aplicações de audição espacial. Considerando as aplicações desenvolvidas, ele funciona adequadamente tanto para a cadeia de reprodução quanto para a cadeia de gravação biauricular.

Adaptado de um projeto da Universidade de Graz, na Áustria, o protótipo foi projetado considerando as opções de soluções disponíveis no Brasil. Apesar das alterações do protótipo da UFSM (em relação ao projeto original), foi possível obter um sistema semelhante cujo funcionamento é idêntico. Para utilizá-lo, são necessários apenas os *software* adicionais que, eventualmente, podem ser substituídos por outras alternativas em novos desenvolvimentos no futuro.

Como contribuição inicial pode-se considerar a descrição detalhada do desenvolvimento, que pode ser aproveitada por educadores e aprendizes que estão trabalhando com o rastreamento de objetos ou com técnicas biauriculares em acústica.

Neste estudo, testes de localização espaciais foram realizados visando avaliar o comportamento e limitações do protótipo, sendo ainda possível identificar incertezas. Embora os resultados dos testes tenham demonstrado que é possível reduzir os erros de localização restringindo as possibilidades de marcação da direção de fontes sonoras no espaço, o Teste 2 ainda apresentou resultados que evidenciam a dificuldade humana na localização quando não há outras pistas (*cues*)

disponíveis para auxiliar. Esse fato é inerente ao sistema auditivo e não ao rastreador de posição.

No Teste Final, por sua vez, foi demonstrado que é possível aprimorar a localização de fontes ao permitir que os voluntários pudessem interagir continuamente (sem limite de tentativas) até que tivessem a sensação plena de que estavam de frente para a fonte sonora. Esse resultado reforça a indicação de que o *head-tracker* desempenhou satisfatoriamente seu papel. Estima-se ainda que o desempenho nesse tipo de teste subjetivo pode ser aprimorado consideravelmente com a utilização de HRTFs personalizadas²⁸, reduzindo o erro ainda presente [48–50].

A avaliação de HRTFs para cabeças artificiais (ou humanas) é um tipo de aplicação que pode ser realizada com o protótipo proposto — caso a incerteza associada não seja um impedimento. Isso pode ser elaborado com uma câmara anecoica e um aparato para girar a fonte sonora ou a cabeça. Além disso, caso seja utilizado em pessoas, adicionalmente o rastreamento da cabeça pode ajudar a promover correções (em um pós-processamento) devido à dificuldade de se ficar parado estaticamente por muito tempo em um ensaio.

Novos desenvolvimentos estão previstos para estudar a viabilidade da comunicação *wireless* (*bluetooth*), buscando evitar incertezas referente à utilização de cabos. No entanto, é interessante observar que isso poderá causar outras incertezas devido à velocidade de transmissão e/ou autonomia de bateria. Ademais, para o futuro, recomendam-se testes com novas plataformas Arduino, acompanhando a evolução dos MCUs.

Por fim, este estudo contribui com conhecimentos para a área de audição espacial e tecnologias de som 3D, proporcionando uma solução acessível e eficaz para o rastreamento de cabeça (para ambientes virtuais, por exemplo). A continuidade da pesquisa e a exploração de aprimoramentos

²⁸As HRTFs personalizadas são específicas para cada indivíduo, levando em conta as características únicas de sua orelha e cabeça. Ao incorporar essas informações individualizadas na simulação de áudio, é possível obter uma reprodução sonora mais exata e imersiva para cada ouvinte.

ramentos promissores abrirão ainda caminhos para futuras aplicações práticas, contribuindo para uma experiência auditiva mais imersiva e realista.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio e infraestrutura da Engenharia Acústica (EAC) [40] e da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) que apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. BLAUERT, Jens. *Communication Acoustics*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 379 p. doi: [10.1007/b139075](https://doi.org/10.1007/b139075). ISBN 978-3540221623.
2. VORLÄNDER, Michael. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. 1. ed. Berlin, Germany: Springer, 2007. 355 p. doi: [10.1007/978-3-540-48830-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-48830-9). ISBN 978-3540488293.
3. XIE, Bosun. *Head-related transfer function and virtual auditory display*. Second edition. [S.l.]: J. Ross Publishing, 2013. 504 p. ISBN 978-1604270709.
4. BLAUERT, Jens. *Spatial Hearing - Revised Edition: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Revised. [S.l.]: The MIT Press, 1997. 508 p. ISBN 9780262024136.
5. GUERIN, Robert. *MIDI power*. Boston, MA: Thomson Course Technology, 2006. ISBN 978-1598630848.
6. RATTON, Miguel. *MIDI Total - Fundamentos e Aplicações*. [S.l.]: Editora Música & Tecnologia, 2005. ISBN 978-8589402057.
7. RUDRICH, Daniel; ZAUNSCHIRM, Markus; ROMANOV, Michael. *MrHeadTracker Wiki/Git*. git.iem.at/DIY/MrHeadTracker/wikis. Acessado em dez. 2018.
8. ROMANOV, Michael; BERGHOLD, Paul; FRANK, Matthias; RUDRICH, Daniel; ZAUNSCHIRM, Markus; ZOTTER, Franz. Implementation and Evaluation of a Low-Cost Headtracker for Binaural Synthesis. In: *Audio Engineering Society Convention 142*. [s.n.], 2017. Disponível em: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18567>.
9. MONK, Simon. *Programming Arduino : getting started with Sketches*. New York: McGraw-Hill, 2016. ISBN 978-1259641633.
10. JANTUNEN, Tommi; MESCH, Johanna; PUUPPONEN, Anna; LAAKSONEN, Jorma. On the rhythm of head movements in finnish and swedish sign language sentences. In: *Speech Prosody 2016: Proceedings of the 8th International Conference on Speech Prosody*. Boston University, USA: [s.n.], 2016. p. 850–853. doi: [10.21437/SpeechProsody.2016-174](https://doi.org/10.21437/SpeechProsody.2016-174).
11. COOK, Mike. *Arduino music and audio projects*. Berkeley, CA New York, NY: Apress/Springer, 2015. ISBN 978-1484217207.
12. TOCCI, Ronald J.; WIDMER, Neal; MOSS, Greg. *Digital systems: principles and applications*. [S.l.]: Prentice Hall, 2011. ISBN 978-0135103821.
13. PERROTT, David R.; SABERI, Kourosh. Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 87, n. 4, p. 1728–1731, 1990. doi: [10.1121/1.399421](https://doi.org/10.1121/1.399421).
14. BRÜEL & KJÆR. *HATS Tipo 4128-C – Simulador de cabeça e tronco*. www.bksv.com. Acessado em dez. 2018.
15. DIAKOPOULOS, Dimitri. *HIDUINO GitHub*. github.com/ddiakopoulos/hiduinio. Acessado em dez. 2018.
16. DIAKOPOULOS, Dimitri; KAPUR, Ajay. HIDUINO: A firmware for building driverless USB-MIDI devices using the Arduino microcontroller. In: *New Interfaces for Musical Expression (NIME) 2011*. Oslo, Norway: [s.n.], 2011. p. 405–408. doi: [10.5281/zenodo.1177995](https://doi.org/10.5281/zenodo.1177995).
17. GUADALUPI, Arturo. *MIDIUSB Library for Arduino*. github.com/arduino-libraries/MIDIUSB. Acessado em dez. 2018.

18. SENSORTEC, Bosch. *Datasheet: BNO055 – Intelligent 9-axis absolute orientation sensor*. 2014. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/products/smart-sensors/bno055/>.
19. Arduino. *Borad Comparison and Specs*. www.arduino.cc/en/products/compare. Acessado em dez. 2018.
20. STOFFREGEN, Paul. *Teensy Project*. www.pjrc.com/teensy. Acessado em dez. 2018.
21. KRONLACHNER, Matthias. *AmbiX v0.2.8 - Ambisonic plug-in suite (website)*. www.matthiaskronlachner.com. Acessado em dez. 2018.
22. KRONLACHNER, Matthias. *AmbiX GitHub*. github.com/kronlachner/ambix. Acessado em dez. 2018.
23. NACHBAR, Christian; ZOTTER, Franz; DELEFLIE, Etienne; SONTACCHI, Alois. *AmbiX - A Suggested Ambisonics Format*. In: *Ambisonics Symposium 2011*. Lexington, Kentucky, US: [s.n.], 2011. Disponível em: <https://iaem.at/ambisonics/proceedings-of-the-ambisonics-symposium-2011>.
24. Spatial Audio Real-time Applications (SPARTA). *An open-source VST audio plug-in suite for spatial audio production, reproduction and visualisation (website)*. http://research.spa.aalto.fi/projects/sparta_vsts/. Acessado em dez. 2018.
25. MCCORMACK, Leo; POLITIS, Archontis. *SPARTA & COMPASS: Real-time implementations of linear and parametric spatial audio reproduction and processing methods*. In: *AES Conference on Immersive and Interactive Audio*. York, UK: [s.n.], 2019. Disponível em: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=20417>.
26. MathWorks. *Matlab*. www.mathworks.com. Acessado em jun. 2018.
27. LAND, Bruce. *Arduino Oscilloscope: 688000 samples/sec*. hackaday.io/project/425-arduino-oscilloscope-688000-samplessec. Acessado em dez. 2018.
28. ZORZO, Arthur; FONSECA, William D'Andrea. Estudo da técnica de identificação de sistemas implementada em microcontroladores Arduino Due e Teensy 3.6. *Acústica e Vibrações*, v. 32, n. 49, p. 5–14, Dez. 2017. ISSN 1983-442X, 2764-3611. doi: 10.55753/aev.v32e49.91.
29. IGOE, Tom. *The Inter-IC Sound (I2S) Protocol*. tgoe.github.io/SoundExamples/i2s.html. Acessado em dez. 2018.
30. ADAFRUIT. www.adafruit.com. Acessado em dez. 2018.
31. SPARKFUN. www.sparkfun.com. Acessado em dez. 2018.
32. Future Technology Devices International Ltd (FTDI). *FT232RL Datasheet, Drivers, FAQ & Application Note*. www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232R.htm. Acessado em dez. 2018.
33. Hairless MIDI to Serial Bridge. projectgus.github.io/hairless-midiserial. Acessado em nov. 2018.
34. Pure Data (Pd). puredata.info. Acessado em out. 2018.
35. SCHMITT, Daniel. *Nerds.de - Audio & MIDI Particles - LoopBe30 and LoopBe1*. www.nerds.de/en/loopbe30.html. Acessado em fev. 2018.
36. BOM, Enzo. *Desenvolvimento de cadeia de medição e reprodução binauricular utilizando dispositivo de rastreamento da cabeça*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2018. doi: 10.13140/RG.2.2.16211.71205.
37. BRINKMANN, Fabian; LINDAU, Alexander; WEINZIERL, Stefan; GEISSLER, Gunnar; PAR, Steven; MÜLLER-TRAPET, Markus; OPDAM, Rob; VORLÄNDER, Michael. *The FABIAN head-related transfer function data base, Manual/Tech. Report, Technische Universität Berlin*. [S.l.], 2017. doi: 10.14279/depositonce-5718.
38. LINDAU, Alexander; WEINZIERL, Stefan; MAEMPEL, H. J. FABIAN - An instrument for software-based measurement of binaural room

impulse responses in multiple degrees of freedom. 24. *Tonmeistertagung - VDT International Convention*, 2006. Disponível em: <https://bit.ly/FABIAN-BRIR>.

39. DIETRICH, P.; MASIERO, B.; MÜLLER-TRAPET, M.; POLLOW, M.; SCHARRER, R. Matlab Toolbox for the Comprehension of Acoustic Measurement and Signal Processing. In: *German Congress on Acoustics – DAGA*. Berlin, Alemanha: [s.n.], 2010. p. 517–518. ISBN 978-3980865982. Toolbox disponível em <http://www.ita-toolbox.org>. Disponível em: <https://bit.ly/daga2010-ita-toolbox>.

40. PAIXÃO, Dinara Xavier da; FONSECA, William D'Andrea. A experiência do ensino de graduação em Engenharia Acústica no Brasil. In: *FIA 2018 - XI Congresso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica - TecniaAcustica'18*. Cadiz, Espanha: [s.n.], 2018. Disponível em: <https://bit.ly/fia2018-eac>.

41. MØLLER, Henrik. Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, v. 36, p. 171–218, 1992. doi: [10.1016/0003-682X\(92\)90046-U](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90046-U).

42. PULKKI, Ville; KARJALAINEN, Matti. *Communication acoustics: an introduction to speech, audio and psychoacoustics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015. ISBN 978-1118866542.

43. DANIEL, Adrien. *Spatial Auditory Blurring and Applications to Multichannel Audio Coding*. Tese (Doutorado) — Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Paris, França, 2011. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00623670/>.

44. PETTITT, A. N. Testing the Normality of Several Independent Samples Using the Anderson-Darling Statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, v. 26, n. 2, p. 156–161, 1977. doi: [10.2307/2347023](https://doi.org/10.2307/2347023).

45. LILLIEFORS, Hubert W. On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor &

Francis, v. 62, n. 318, p. 399–402, 1967. doi: [10.1080/01621459.1967.10482916](https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916).

46. JARQUE, Carlos M.; BERA, Anil K. A Test for Normality of Observations and Regression Residuals. *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique*, [Wiley, International Statistical Institute (ISI)], v. 55, n. 2, p. 163–172, 1987. ISSN 0306-7734, 1751-5823. doi: [10.2307/1403192](https://doi.org/10.2307/1403192).

47. ROYSTON, J. P. An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, v. 31, n. 2, p. 115–124, 1982. doi: [10.2307/2347973](https://doi.org/10.2307/2347973).

48. BOMHARDT, Ramona. *Anthropometric Individualization of Head-Related Transfer Functions Analysis and Modeling*. Tese (Doutorado) — RWTH Aachen University, Aachen, Alemanha, 2017. ISBN: 978-3832545437. Disponível em: <http://publications.rwth-aachen.de/record/699551>.

49. MASIERO, B.; DIETRICH, P.; POLLOW, M.; FELLS, J.; VORLÄNDER, M. Design of a Fast Individual HRTF Measurement System. In: *German Congress on Acoustics – DAGA*. Darmstadt, Alemanha: [s.n.], 2012. ISBN 978-3939296041. Disponível em: http://pub.degaakustik.de/DAGA_2012.

50. RICHTER, Jan-Gerrit. *Fast measurement of individual Head-Related Transfer Functions*. Tese (Doutorado) — RWTH Aachen University, Alemanha, 2019. doi: [10.18154/RWTH-2019-04006](https://doi.org/10.18154/RWTH-2019-04006).

Técnica rápida para geração de aurilizações utilizando redes neurais artificiais

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

¹Laboratório 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

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, ratenenbaum@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

Um dos objetivos do desenvolvimento e do aperfeiçoamento de técnicas numéricas em sistemas de geração de realidade virtual acústica e produção de aurilizações fidedignas, consiste na redução do custo computacional e, simultaneamente, garantir a qualidade sonora da simulação. Neste artigo, é apresentada uma nova técnica para modelar as funções de transferência associadas à cabeça humana, necessárias ao cômputo das respostas impulsivas biauriculares. São utilizadas redes neurais artificiais do tipo funções de base radial. Um conjunto dessas redes é treinado e testado de modo a cobrir todo o espaço auditivo no entorno da cabeça. Cada rede neural para uma dada direção tem como entrada o espectro da frente de onda sonora que atinge o receptor e, como saída, a resposta impulsiva associada à cabeça humana filtrada, para a direção correspondente. Desse modo, trabalha-se diretamente no domínio do tempo, contornando-se a necessidade de convoluções com uma redução do custo computacional em cerca de 90%. A técnica proposta é comparada com o método das convoluções, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Os resultados simulados demonstram a eficiência da técnica proposta, com valores de correlação bem próximos de um. Para validar o resultado, testes preliminares utilizando índices de articulação para comparar a percepção da fala em uma sala real e na mesma sala simulada computacionalmente utilizando a modelagem das respostas impulsivas filtradas aqui descrita foram conduzidos, com resultados plenamente satisfatórios.

Palavras-chave: realidade virtual acústica, aurilização em salas, geração de BRIRs, redes neurais artificiais, simulação de campo acústico em salas, índice de articulação.

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

Fast technique for auralization generation using artificial neural networks

Abstract

The main goal in development of numerical techniques in acoustic virtual reality systems and production of reliable auralizations is to reduce the computational cost and, at the same time, to guarantee the sound quality. In this paper, a new technique for modeling head-related transfer functions are presented. Artificial neural networks of the radial basis functions type are used. A set of these networks is trained and tested to cover the entire auditory space around the head. Each neural network for a given direction has as input the spectrum of the sound ray that reaches the receiver and, as output, the filtered head-related impulse response, for the corresponding direction working directly in the time domain and circumventing the need for convolutions with a computational cost reduction of 90%. The proposed technique is compared with the convolution method in both the time and frequency domain. The results show the efficiency of the proposed technique, with correlation values very close to one. To validate the result, preliminary tests using articulation indices to compare speech intelligibility in an actual and virtual room were conducted, with fully satisfactory results.

Keywords: acoustic virtual reality, room auralization, BRIRs generation, artificial neural networks, room acoustic simulation, articulation index.

1. INTRODUÇÃO

A técnica conhecida como Realidade Virtual Acústica (RVA) tem como objetivo, recriar ambientes sonoros a partir de dados medidos, sintetizados ou simulados [1]. Seu leque de aplicações é bem vasto, varrendo desde o controle de ruído em plantas industriais, a avaliação subjetiva de isolamento acústico entre recintos, o auxílio ao projeto acústico de salas para múltiplos usos, a melhoria da inteligibilidade da fala em salas de aula, dentre muitos outros. O resultado mais proeminente em RVA consiste na aurilização de salas que nada mais é do que a geração de sinais sonoros a serem escutados, geralmente por meio de fones de ouvido, que permitem criar a sensação auditiva de imersão no ambiente que foi simulado [2]. Isso é muito útil, por exemplo, para projetar determinado ambiente, de forma a que se possa prever o comportamento acústico da sala, antes de sua construção. Na correção acústica de ambientes existentes, a aurilização é uma ferramenta de grande aplicabilidade para verificar se as soluções acústicas adotadas resultarão no campo sonoro desejado.

Para obter uma aurilização a partir de dados simulados é necessário, naturalmente, dispor de um simulador de acústica de salas que forneça de forma adequada e confiável, para um dado par fonte-receptor, as respostas impulsivas biauriculares da sala (BRIRs – da sigla em inglês, *Binaural Room Impulse Responses*), núcleo do procedimento de aurilização [3]. Para tal fim, o simulador necessita modelar as fontes, os receptores, as superfícies de contorno da sala, com suas características acústicas (coeficientes de absorção e de espalhamento) e os diversos fenômenos intervenientes na propagação de ondas acústicas em recintos [4,5]. Cumpre notar que o receptor a ser modelado não constitui um microfone onidirecional, mas sim a cabeça de uma pessoa. A modelagem desse receptor é feita por meio de funções direcionais conhecidas como respostas impulsivas associadas à cabeça humana (HRIRs – da sigla

em inglês, *Head Related Impulse Responses*) ou das funções de transferência associadas à cabeça (HRTFs – da sigla em inglês, *Head Related Transfer Functions*), estas últimas dadas no domínio da frequência. São essas funções que conferem as características de filtragem em frequência resultante da inserção da cabeça humana no campo sonoro, as principais responsáveis pela sensação de espacialidade da audição humana [3], sendo fortemente dependentes da direção de chegada das ondas sonoras. Cumpre notar, ainda, que essas funções diferem um pouco entre pessoas, pois cada indivíduo possui dimensões antropométricas levemente diferenciadas, particularmente no que toca ao formato da cabeça, da parte superior do torso e do pavilhão auricular.

As BRIRs são, então, obtidas a partir das informações das frentes de onda – que, doravante, denominaremos como *raios acústicos* ou, simplesmente, *raios* –, obtidas a partir da simulação acústica da sala, e das HRIRs. Por fim, na última etapa de um sistema de aurilização, é feita a convolução de um sinal monofônico e anecoico com as BRIRs. A saída obtida é, então, reproduzida, utilizando-se fones de ouvido de boa qualidade, preferencialmente equalizados.

Diante do exposto, dois elementos essenciais para gerar aurilização são a simulação acústica da sala e a modelagem das HRTFs. Para a simulação acústica da sala são utilizados os métodos baseados na teoria ondulatória, na acústica geométrica ou na acústica estatística. A teoria ondulatória permite o estudo dos modos de baixa frequência da sala e tem sido negligenciada pelos desenvolvedores de programas de simulação em salas [6]. A principal razão é que somente geometrias retangulares possuem solução analítica fechada e todas as demais demandam a utilização de métodos numéricos, tais como o método dos elementos finitos ou o método dos elementos de contorno, com um alto custo computacional. Já os métodos da acústica geométrica são os mais utilizados em

simulação de salas [7]. Os métodos de traçado de raios [8–10], traçado de cones ou pirâmides [11] e o método das imagens ou fontes virtuais [12] têm sido os mais utilizados nessa linha, com bons resultados. Contudo, em se tratando de aurilização, as reflexões difusas desempenham um papel fundamental no preenchimento da cauda reverberante [13] e necessitam ser cuidadosamente modeladas. Um método que tem se mostrado acurado nessa linha é o método dos caminhos aleatórios, também conhecido como da radiosidade [14,15], a despeito de seu custo computacional ser mais elevado do que os métodos da acústica geométrica.

Quanto às HRIRs/HRTFs há diversas maneiras de caracterizá-las. A primeira delas é, naturalmente, através de medições. Desde a década de 1990 vêm sendo publicados bancos de dados de HRIRs com diferentes refinamentos. O banco de dados do manequim KEMAR [16], por exemplo, apresenta dados de medição para 720 direções, para cada ouvido. O mais recente e completo banco de dados publicado apresenta medições para 64.442 direções para cada ouvido do manequim FABIAN [17]. Isso corresponde a uma HRIR de grau em grau, tanto no azimute quanto na elevação, resultando em uma acurácia superior ao limiar do observável, ou (JND – da sigla em inglês, *Just Noticeable Difference*) [18].

Há, também, diversas técnicas de modelagem das HRIRs/HRTFs [19–22]. A questão básica na modelagem dessas funções fundamenta-se no binômio eficácia versus fidedignidade. Em outros termos, trata-se de produzir modelos que permitam uma maior eficiência computacional na geração das BRIRs, mantendo, sobretudo, a fidedignidade das aurilizações.

Cumprir notar que o cálculo das BRIRs envolve não só a modelagem das HRIRs (ou HRTFs), mas, também, em uma etapa subsequente, o cômputo das HRIRs filtradas. Isso corresponde ao produto de convolução entre o raio que chega ao receptor e a HRIR da

direção correspondente. O produto de convolução torna o custo computacional dessa etapa de geração de aurilizações extremamente custoso, devido à grande quantidade de raios sonoros que chegam no receptor e a consequente necessidade de realização de numerosas convoluções.

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo principal apresentar uma modelagem que permita recuperar as HRIRs filtradas utilizando redes neurais artificiais (RNAs). O uso das RNAs traz vantagem em relação ao método tradicional de geração das BRIRs que utiliza convoluções, por apresentar um menor custo computacional. Para tal, foi desenvolvido um conjunto de redes neurais artificiais do tipo funções de base radial (RBF – da sigla em inglês, *Radial Basis Functions*) [23,24] especializadas na geração de HRIRs filtradas. Cada rede está associada a uma direção de chegada e possui como entrada os componentes do espectro do raio acústico, em bandas de oitava, e como saída a HRIR filtrada, tal como descrito na Seção 4. O núcleo do procedimento de aurilização é o simulador de acústica de salas. Este deve ser alimentado com as informações sobre a geometria da sala que, por sua vez, deve conter os dados dos coeficientes de absorção e espalhamento das superfícies de acabamento, informações sobre as fontes sonoras, incluindo seus dados de direcionalidade, e informações sobre os receptores, que devem incluir o banco de dados das HRIRs/HRTFs da cabeça receptora. A saída do simulador – no que toca à geração de aurilizações – são as BRIRs, para cada par fonte-receptor previamente selecionado. Finalmente, escolhendo-se um dado sinal anecoico, sua convolução com as BRIRs fornecerá o sinal sonoro aurilizado desejado, também para cada par fonte-receptor. A Figura 1 ilustra o esquema geral para a geração de uma aurilização.

Na Seção 2, discute-se o método tradicional de geração das BRIRs; na Seção 3 é feita uma brevíssima apresentação do simulador de acústica de salas utilizado; a Seção 4 descreve sucintamente o modelo das redes neurais

artificiais; a Seção 5 apresenta o modelo para geração das BRIRs aqui proposto. Na Seção 6 são apresentados os principais resultados, comparando-se as HRIRs/HRTFs filtradas calculadas pelo método da convolução e pelo método das redes neurais artificiais, bem como ensaios preliminares de validação via testes de articulação. As principais conclusões do trabalho são discutidas na Seção 7.

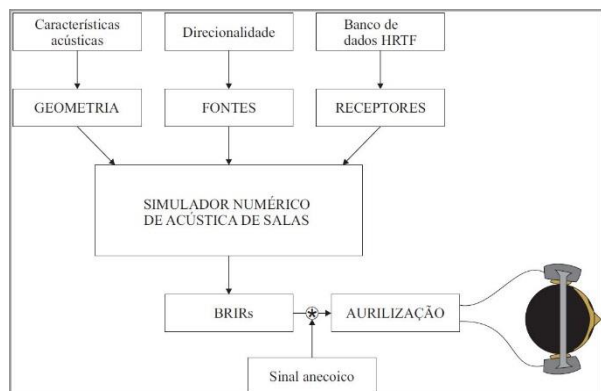


Figura 1: Esquema geral para gerar um som aurilizado.

2. SOBRE O MÉTODO TRADICIONAL DE GERAÇÃO DAS BRIRs

Para o procedimento de geração das respostas impulsivas biauriculares, $b_E(t)$ e $b_D(t)$, onde E e D referem-se aos ouvidos esquerdo e direito, respectivamente, e t é o tempo, são necessárias as seguintes informações: a) para cada raio acústico que chega ao receptor, seu espectro de energia (E_n) por banda de oitava (63 Hz – 16 kHz), o tempo de chegada (τ_n) e os ângulos de chegada (φ_n – azimute e θ_n – elevação), sendo o índice n um contador dos raios; b) as HRIRs, dos dois ouvidos, $h_E(\theta_n, \varphi_n, t)$ e $h_D(\theta_n, \varphi_n, t)$ da cabeça que está sendo simulada.

A Figura 2 ilustra o procedimento para a geração das BRIRs, segundo o método das convoluções.

Observe-se que o simulador de salas gera um conjunto de raios acústicos que atingem o receptor com três informações: o tempo de chegada; o espectro de energia; e a direção de chegada, para cada raio. Esta última informação seleciona a HRTF do banco de dados da direção mais próxima. Em seguida, é

efetuado o produto complexo entre o espectro em bandas de oitava do raio e a HRTF selecionada (dois canais, um para cada ouvido). Para efetuar esse produto, na técnica clássica, cada uma das nove bandas de oitava em que o espectro do raio é dividido é multiplicada pela média espectral, na banda correspondente, da HRTF em questão.

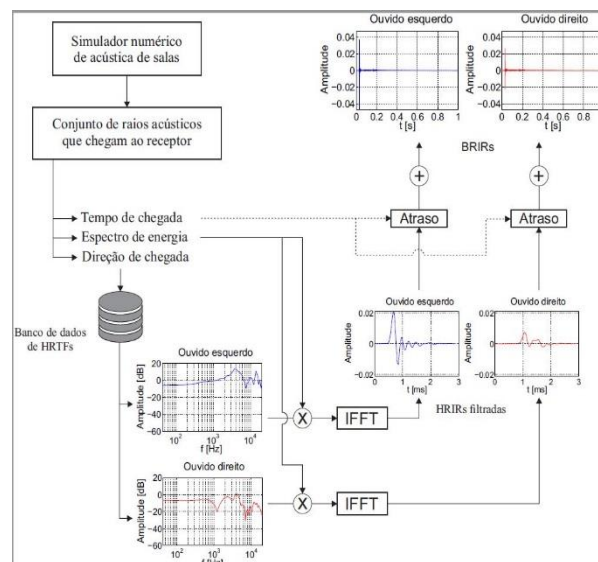


Figura 2: Panorama geral do cômputo de uma BRIR utilizando o método das convoluções.

Na sequência, aplica-se a transformada inversa rápida de Fourier (IFFT), para se obter as HRIRs filtradas para os ouvidos esquerdo e direito. Estas, por sua vez, são atrasadas segundo o tempo de chegada de cada raio e, finalmente, adicionadas para a obtenção da BRIR. O produto complexo acima mencionado, seguido da aplicação da IFFT nos dois canais, equivale à convolução do raio acústico com a HRIR da direção correspondente e, por essa razão, esse procedimento é chamado de *método da convolução*.

3. O CÓDIGO RAIOS 7

O código computacional para simulação de acústica de salas RAIOS (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*) vem sendo desenvolvido desde o final da década de 1990 pelos autores, estando atualmente em sua Versão 7. O código opera um algoritmo híbrido que utiliza o método de traçado de

raios (*ray-tracing*) para o cálculo das reflexões especulares, incluindo a absorção nas superfícies e a atenuação do ar, com o método das matrizes de transição – também conhecido como método da radiosidade – para o cálculo das reflexões difusas [5].

A Figura 3 ilustra o método das matrizes de transição, que não é usual em programas de simulação em salas.

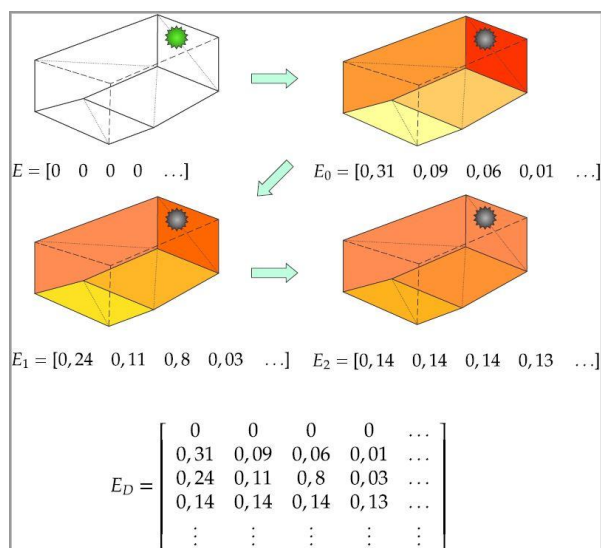


Figura 3: Esquema ilustrativo do método de cálculo das reflexões difusas por meio de matrizes de transição.

No instante inicial, a energia sonora está toda contida na fonte; passado um intervalo de tempo, essa energia é distribuída entre as diversas superfícies segundo o ângulo sólido com que cada uma delas é vista pela fonte (a parede mais próxima à fonte fica mais energizada, como mostra a Figura 3). Na sequência, todas as superfícies emitem para todas as demais, sempre segundo os ângulos sólidos relativos, de modo que, aos poucos, a energia sonora vai se distribuindo mais uniformemente pela sala. O procedimento é descrito matematicamente e numericamente por meio de matrizes – cujas colunas representam as diversas superfícies em que o contorno da sala é subdividido e cujas linhas representam o tempo discretizado – que vão se atualizando ao longo do processo de difusão. O resultado final é uma cauda reverberante mais densa, ou melhor preenchida, e mais próxima daquela que é observada experimentalmente.

O programa RAIOS participou da comparação internacional de programas de simulação de acústica de salas, *Round Robin 3* (RR3) [6,25], tendo obtido excelentes resultados na média dos diversos parâmetros de qualidade acústica simulados, confrontados com os mesmos parâmetros medidos, como ilustra a Figura 4. Contudo, naquela ocasião (2002), não se avaliou a capacitação dos programas participantes para gerar aurilizações.

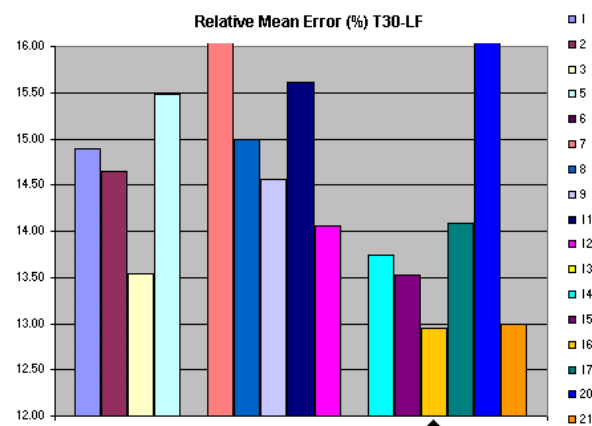


Figura 4: Média dos erros médios relativos para diversos parâmetros de qualidade acústica, com respeito aos medidos, entre os participantes do RR3. O RAIOS (em sua Versão 3) é o *software* de número 16, indicado com a seta.

4. DESCRIÇÃO DO MODELO DAS RNAs

Redes neurais artificiais (RNAs) constituem a base daquilo que hoje é conhecido como inteligência artificial ou inteligência computacional [26]. RNAs são muito utilizadas em engenharia para resolver problemas de natureza não linear, inclusive na área de acústica [27]. Além disso, RNAs são também muito úteis para o reconhecimento de padrões. E é justamente essa característica que pode ser largamente explorada para modelar as respostas impulsivas associadas à cabeça humana.

O tema das RNAs é por demais vasto para ser analisado aqui. Para maiores informações remete-se a [28] e [29]. Todavia, algumas informações básicas são discutidas a seguir. Primeiramente, para uma RNA aprender um determinado padrão de funções, é necessário o seu *treinamento* ou *procedimento de*

aprendizagem, que pode ser ou não supervisionado. A Figura 5 ilustra o esquema de aprendizagem supervisionado que foi utilizado neste trabalho. A rede é alimentada com um padrão de entrada e a saída corrente é comparada com a saída desejada. A partir do erro encontrado, os pesos da rede são ajustados segundo um dado algoritmo de minimização, até que um determinado critério de parada seja alcançado.

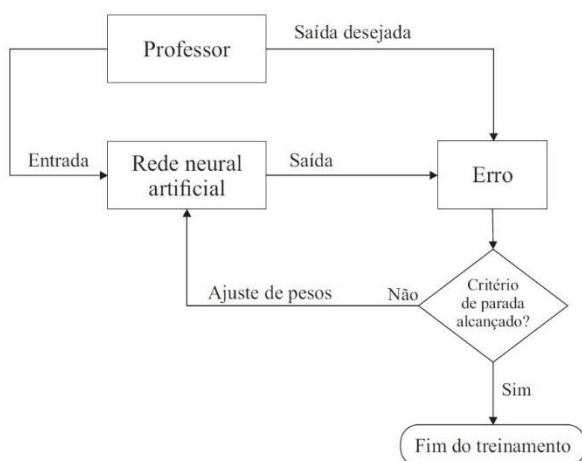


Figura 5: Esquema de treinamento supervisionado para uma rede neural artificial.

Uma vez treinada, a rede necessita ser testada, ou seja, é preciso verificar se ela aprendeu o padrão adequadamente. Redes superdimensionadas podem gerar os erros de *overfitting*, enquanto redes subdimensionadas podem causar *underfitting*. No primeiro caso, a rede memoriza os padrões de tal forma que perde a capacidade de generalização; no segundo caso, a rede não consegue aprender os padrões de forma satisfatória. Os padrões utilizados no teste das redes necessariamente deverão ser diferenciados daqueles utilizados no treinamento. O banco de dados de HRIRs utilizado para o treinamento das RNAs foi o de [17] e um conjunto de 64.442 redes neurais foram treinadas e testadas, uma para cada direção, com discriminação de um grau.

Dentre os diversos tipos de redes disponíveis para as mais variadas aplicações, adotamos, por sua maior facilidade de treinamento e, principalmente, por seu baixo custo computacional na fase de execução, as redes

conhecidas como funções de base radial (RBF – da sigla em inglês, *Radial Basis Functions*). As redes do tipo RBF possuem apenas uma camada intermediária. Constituem redes não retroalimentadas, ou progressivas, também chamadas de redes não recorrentes.

A Figura 6 ilustra a arquitetura da rede RBF utilizada neste trabalho. Observe-se que há apenas uma camada intermediária, onde cada neurônio φ_j , $j = 1, 2, \dots, k$ recebe informação dos nós de entrada e as processa para os neurônios de saída.

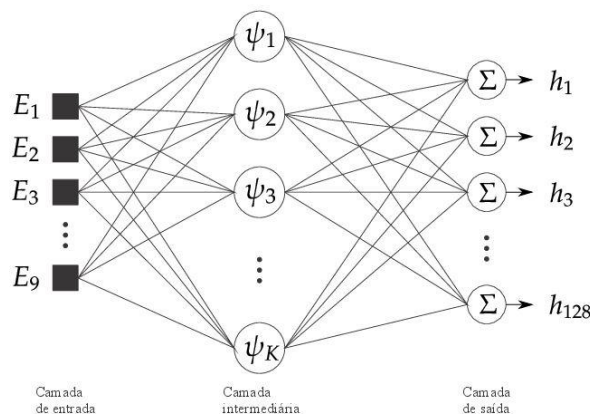


Figura 6: Arquitetura da rede neural do tipo RBF utilizada neste trabalho.

O número de nós na entrada da rede adotada é nove, correspondendo à energia do raio que chega ao receptor filtrada em nove bandas de oitava (63 Hz a 16 kHz). A camada de saída possui 128 neurônios, que correspondem à amplitude da HRIR filtrada discretizada em 128 amostras por canal. A camada intermediária possui k neurônios, onde k é um número a ser investigado. Os melhores resultados em termos de custo-benefício foram obtidos para $k = 5$.

5. SOBRE O MÉTODO DE GERAÇÃO DAS BRIRs UTILIZANDO RNAs

Apresenta-se nesta seção um novo método de geração das BRIRs utilizando-se RNAs do tipo RBF, com a arquitetura apresentada na Figura 6. A ideia central desse método é modelar as HRIRs, diretamente no domínio do tempo, contornando a necessidade de

convoluções e, conseqüentemente, minimizando o custo computacional. A Figura 7 ilustra o procedimento geral de geração das BRIRs pelo método das RNAs, aqui proposto.

A parte inicial é idêntica, ou seja, a simulação acústica da sala fornece o conjunto de raios que atingem o receptor com as informações de tempo, espectro e direção. No lugar do banco de dados das HRTFs, utiliza-se o banco de dados de RNAs, descrito na Seção 4. Com a informação da direção é selecionada a rede RBF previamente treinada para aquela direção.

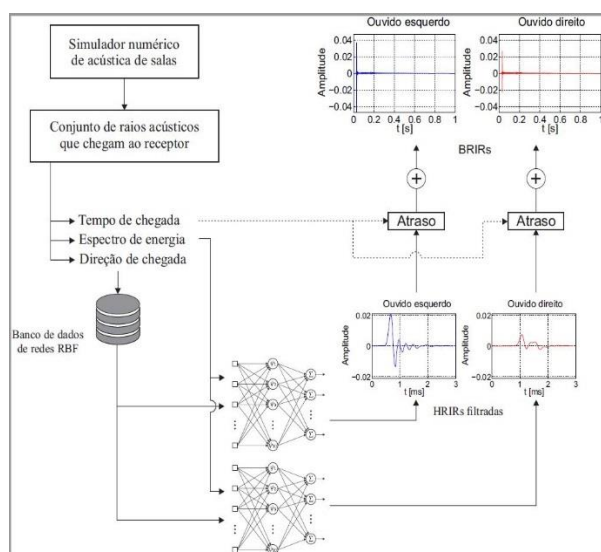


Figura 7: Panorama geral do cômputo de uma BRIR utilizando o método das redes neurais artificiais.

A informação do espectro do raio, então, passa a ser o dado de entrada (nove bandas) da rede, cuja saída será a HRIR filtrada (dois canais), com 128 amostras em cada canal. O procedimento a seguir, como pode ser observado na Figura 7, é o mesmo, ou seja, as HRIRs filtradas são atrasadas segundo o tempo de chegada do raio ao receptor e sucessivamente adicionadas para compor a resposta impulsiva biauricular.

Por trabalhar diretamente no domínio do tempo e evitar o procedimento de convolução, o ganho computacional é de aproximadamente 90%, ou seja, o cálculo da BRIR é efetuado em cerca de 1/10 do tempo daquele despendido pelo método das convoluções [30].

É importante observar que, na simulação computacional de acústica de salas, há dois gargalos fundamentais, ou seja, há dois blocos de cálculo que são computacionalmente mais custosos. O primeiro, diz respeito à simulação da sala para gerar o conjunto de raios acústicos que chegam a cada receptor. Para se ter um resultado mais preciso, principalmente se a sala for grande e de geometria complexa, pode ser necessário, no cômputo das reflexões especulares via traçado de raios, um número substancial de raios emitido pela fonte, podendo ser este da ordem de $10^5 \sim 10^6$. Além disso, o cálculo das reflexões difusas, envolvendo o fenômeno do espalhamento – que no código computacional RAIOS 7 é efetivado pelas matrizes de transição – também tem um custo computacional alto, principalmente quando geometrias complexas exigem um grande número de superfícies planas para sua correta modelagem. No algoritmo híbrido do código RAIOS 7, as reflexões difusas também são convertidas em raios sonoros e, portanto, compõem o conjunto do segundo bloco das Figuras 2 e 7. Nesse primeiro gargalo, portanto, não há participação das redes neurais artificiais.

É no segundo gargalo que as redes promovem uma economia computacional substancial: no cálculo das BRIRs. A etapa da geração das respostas impulsivas biauriculares para cada par fonte-receptor, principalmente para diversos pares, costuma ter um custo computacional equivalente ao da simulação da sala. Nessa etapa, portanto, o modelo das RNAs mostra-se extremamente conveniente.

Se, digamos, para uma sala de geometria medianamente complexa, p.e., o Cenário 10 utilizado no *Round-Robin 4* [31], o cálculo da simulação da sala, gerando todos os raios, especulares e difusos, que atingem cada receptor e o cálculo das respostas impulsivas monoauriculares para, digamos, dez pares fonte-receptor pode levar a um tempo de cálculo de cerca de três horas em um *laptop*. O cômputo das respostas impulsivas biauriculares para os dez receptores – pelo método clássico das convoluções – pode

chegar a um tempo de processamento equivalente. Contudo, como será visto nas próximas seções, utilizando-se o método das RNAs, esse tempo de cálculo cai para menos de vinte minutos.

6. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados resultados comparativos entre as HRIRs filtradas (e suas correspondentes no domínio da frequência) calculadas pelo método tradicional das convoluções (MC), tal como ilustrado na Figura 2 e pelo método das redes neurais artificiais (MRN), tal como ilustrado na Figura 7.

São também apresentados resultados comparativos entre índices de articulação reais e virtuais, estes gerados a partir de simulações de uma sala com o código computacional RAIOS 7, utilizando o método das RNAs, para gerar as BRIRs.

Como já ficou demonstrado em trabalhos anteriores [32,33], índices de articulação constituem uma métrica confiável para avaliar aurilizações. Nesse caso, a ideia é comparar índices de articulação medidos em uma sala real com os índices obtidos a partir de aurilizações – avaliadas com fones de ouvido – da mesma sala simulada pelo código computacional RAIOS 7 com a modelagem das HRIRs filtradas com redes neurais artificiais.

6.1. HRIRs e HRTFs filtradas

Como para cada uma das 64.442 direções há uma RNA do tipo RBF dedicada, seria inviável apresentar os resultados comparativos para todas as direções. Foram escolhidas para serem mostradas aqui apenas quatro das direções, representativas do entorno da cabeça humana, cada uma delas concernente a um dos quadrantes em que se pode particionar a esfera. Dentro de cada quadrante a escolha da direção foi feita de forma aleatória. Cada direção é definida por um ângulo de azimute, φ , e de elevação, θ , no padrão usualmente utilizado

para as coordenadas esféricas no entorno da cabeça [1].

Embora a comparação entre as HRIRs filtradas para as direções selecionadas já daria uma boa ideia de como os dois métodos de cálculo são equivalentes em termos de acurácia, apresentam-se também as HRTFs filtradas (complexas) correspondentes, tanto em magnitude como em fase.

De modo a com mais precisão avaliar a diferença entre as curvas geradas pelos dois métodos, uma vez que a mera inspeção visual não evidencia as diferenças, adota-se o coeficiente de correlação cruzada normalizado (NCCC – da sigla em inglês, *Normalized Cross Correlation Coefficient*) [34,35].

O NCCC indica a similaridade entre duas determinadas funções, sendo definido por

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N u_j(p)y_j(p)}{\sqrt{\left\{ \sum_{j=1}^N [u_j(p)]^2 \right\} \left\{ \sum_{j=1}^N [y_j(p)]^2 \right\}}}, \quad (1)$$

em que u_j e y_j são as duas funções cuja similaridade está sendo comparada e N é o número de pontos de discretização das funções. No nosso caso, $N = 128$. Quanto mais similares forem as duas funções, sendo comparadas, mais próximo de um será o coeficiente r .

As Figuras 8 a 11 apresentam os resultados comparativos entre as HRIRs filtradas (domínio do tempo) e as HRTFs filtradas correspondentes, em magnitude e fase (domínio da frequência) para quatro direções escolhidas, calculadas tanto pelo método clássico da convolução (MC) como pelo método aqui proposto das redes neurais artificiais (MRN). Todavia, essas comparações foram efetuadas para todas as 64.442 direções, varrendo o amplo intervalo ($0 < \varphi < 360$), ($-90 < \theta < 90$), e obteve-se valores de coeficientes de correlação cruzada

normalizado variando entre 0,9985 e 1,000 [36].

O que se evidencia como caráter geral, observando a Figura 8, é que as três curvas praticamente superpõem-se duas a duas, ou seja, não há diferença observável, tanto na função temporal como nas frequenciais, entre os resultados obtidos pelos dois métodos. O valor calculado do NCCC, $r \approx 1$, confirma esse fato.

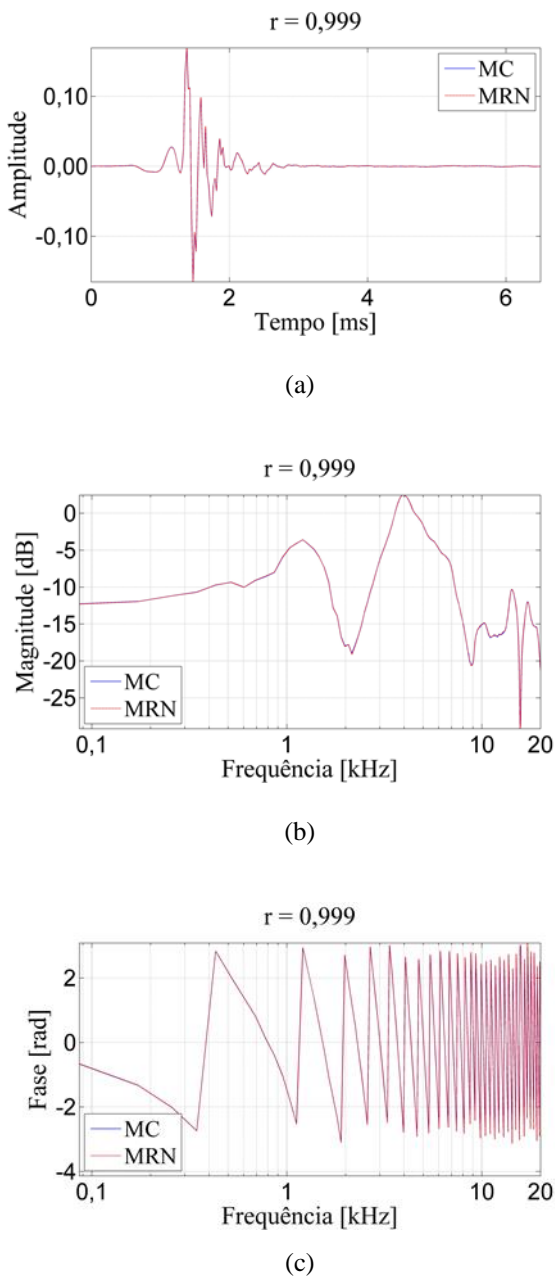


Figura 8: Comparação entre a HRIR/HRTF filtrada, calculada pelos dois métodos (MC e MRN), para a direção $\varphi = 7^\circ$ e $\theta = 23^\circ$. (a) Amplitude; (b) magnitude; e (c) fase.

Como se pode observar das Figuras 8 a 11, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência (amplitude e fase) a similaridade entre as curvas é muito alta, com o coeficiente de correlação cruzada normalizado indicando o valor $r = 0,999$ para todos os gráficos.

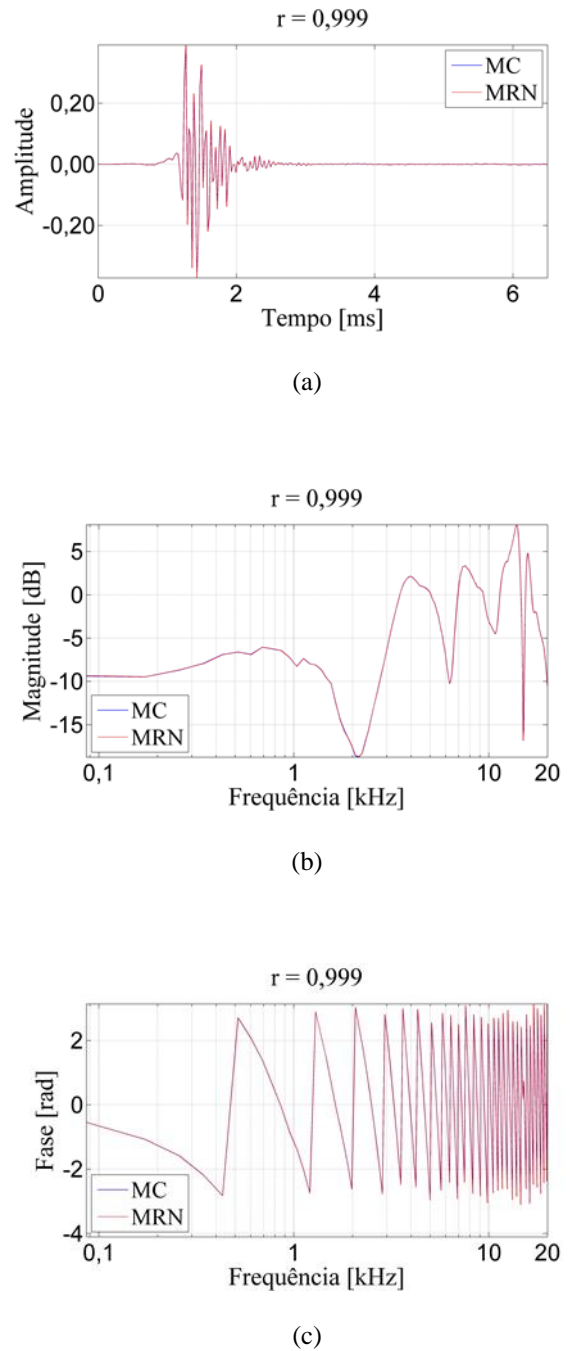
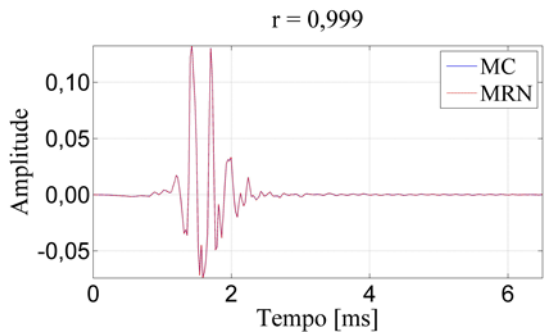
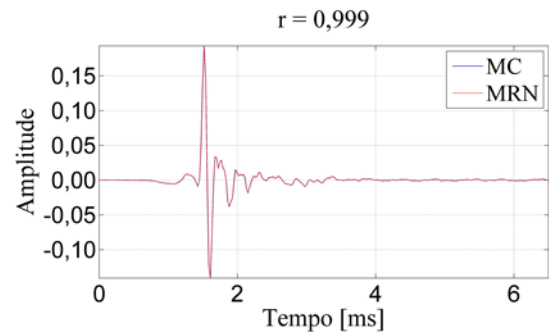


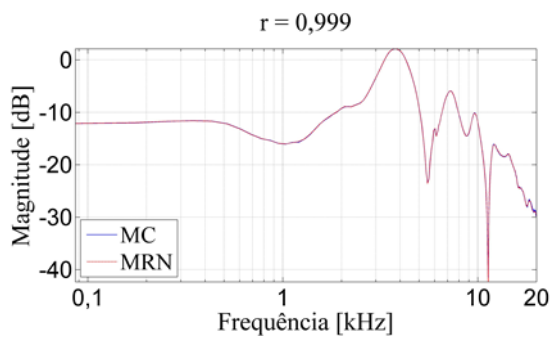
Figura 9: Comparação entre a HRIR/HRTF filtrada, calculada pelos dois métodos (MC e MRN), para a direção $\varphi = 39^\circ$ e $\theta = -21^\circ$. (a) Amplitude; (b) magnitude; e (c) fase.



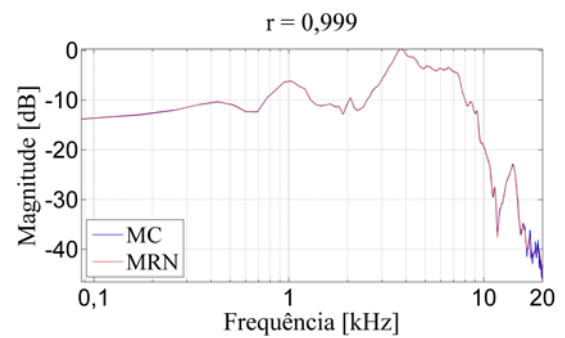
(a)



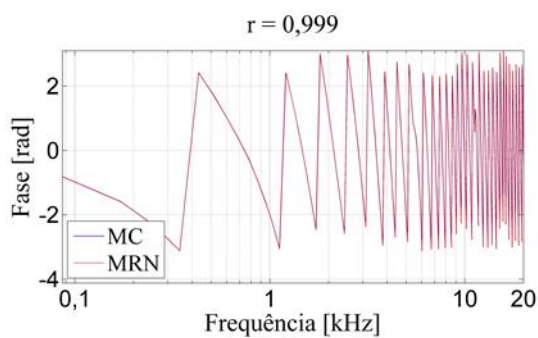
(a)



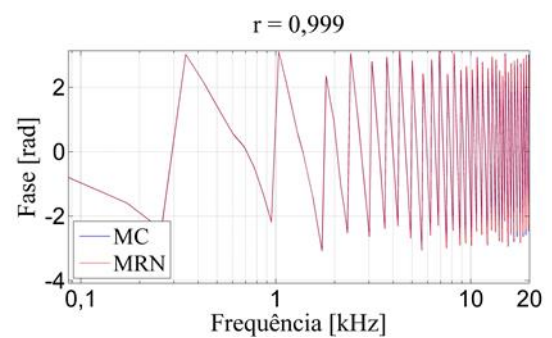
(b)



(b)



(c)



(c)

Figura 10: Comparação entre a HRIR/HRTF filtrada, calculada pelos dois métodos (MC e MRN), para a direção $\varphi = 342^\circ$ e $\theta = -65^\circ$. (a) Amplitude; (b) magnitude; e (c) fase.

Figura 11: Comparação entre a HRIR/HRTF filtrada, calculada pelos dois métodos (MC e MRN), para a direção $\varphi = 321^\circ$ e $\theta = 58^\circ$. (a) Amplitude; (b) magnitude; e (c) fase.

6.2. Testes de articulação

Aurilizações, por se tratarem de sinais sonoros a serem ouvidos por humanos, possuem um caráter eminentemente subjetivo e multi-dimensional e, conseqüentemente, oferecem uma grande dificuldade em serem avaliadas por meio de métricas objetivas. Diversas tentativas têm sido feitas no sentido de definir métricas para aurilizações, sendo a mais geral e completa delas o *Spatial Audio Quality Inventory* (SAQI), que reúne um conjunto de 42 termos, em língua inglesa, para avaliação subjetiva da qualidade espacial de um sinal de áudio [36]. Contudo, somente termos bastante vagos como ‘maior’ ou ‘menor’, ‘mais intenso’ ou ‘menos intenso’, são utilizados nesse gênero de avaliação.

Alguns autores têm ido em outra direção, buscando atributos mais objetivos, com vistas a uma métrica que possa fornecer um *valor*. Esse é o caso do *índice de articulação* [32,37]. Índices de articulação, uma métrica utilizada para avaliação de inteligibilidade da fala em salas, embora constituam um pequeno subconjunto da multidimensionalidade do som espacial, permitem uma valoração da aurilização quando confrontado com os mesmos índices avaliados na sala real.

A metodologia utilizada neste trabalho para o levantamento dos índices de articulação de uma sala, real e virtual, é similar à apresentada por [37]. Em essência, em uma sala de aula de médias dimensões (~180 m²), 36 voluntários, estudantes de graduação de ambos os sexos, são posicionados, em quatro grupos de nove, no entorno de quatro posições tomadas, como referência, como indica a Figura 12. Essas quatro posições são as utilizadas posteriormente como as coordenadas dos receptores na simulação da sala.

Listas de cem monossílabos, gravados em câmara anecoica, são emitidos por um orador artificial, ver Figura 13, que reproduz proximamente a direcionalidade de um ser humano. Os ditados são anotados pelos voluntários e posteriormente corrigidos para

identificar o índice de acerto de cada um. A média dos acertos para cada grupo de nove pessoas constitui, então, o índice de articulação real (IAR) daquele par fonte-receptor na sala.

A mesma sala é simulada no código computacional RAIOS 7 – utilizando a modelagem das HRIRs filtradas por meio de RNAs –, para cada um dos quatro pares fonte-receptor e são computadas as BRIRs para essas posições.

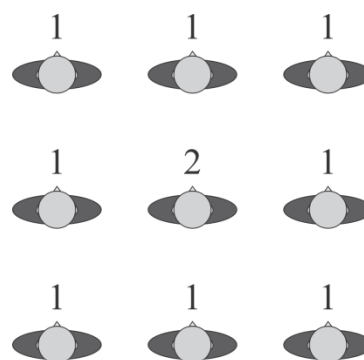


Figura 12: Disposição de cada grupo de nove voluntários com um na posição central (2), posição utilizada na simulação do receptor, e os demais (1) em torno.



Figura 13: Orador artificial utilizado nos testes de articulação reais.

Utiliza-se a mesma lista de palavras do teste de articulação real, porém com a ordem embaralhada. Esse sinal anecoico, então, é convoluído com cada uma das quatro BRIRs, gerando os quatro sinais de aurilização que serão objeto dos ensaios virtuais.

A seguir, esses sinais são escutados por meio de fones de ouvido equalizados por nove voluntários para cada par fonte-receptor e os monossílabos anotados. Finalmente, os ditados

virtuais são corrigidos, atribuindo-se um índice de articulação virtual (IAV) para cada uma das quatro posições fonte-receptor.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre os índices de articulação reais e virtuais, para os quatro pares de posição fonte-receptor.

Tabela 1: Comparação entre os índices de articulação reais e virtuais para quatro pares fonte-receptor na sala. Todos os valores estão em percentual (%).

| | PAR 1 | PAR 2 | PAR 3 | PAR 4 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Medido (IAR) | 92 | 89 | 88 | 90 |
| Simulado (IAV) | 95 | 93 | 90 | 93 |
| Diferença (R-V) | -3 | -4 | -2 | -3 |

Como se pode depreender da Tabela 1, os IARs mostraram-se, para todos os quatro pares fonte-receptor, menores do que os IAVs, embora a média da diferença seja de somente 3%. A melhor ideia que se tem por ora sobre essa tendência sistemática é que a reverberação de baixa frequência da sala não é integralmente reproduzida na simulação, que não contempla acústica modal. Contudo, este é um aspecto ainda sob investigação.

7. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma nova técnica para modelar as funções de transferência associadas à cabeça humana, que constitui o cerne da geração de respostas impulsivas biauriculares para a produção de aurilizações.

O modelo é baseado em redes neurais artificiais do tipo funções de base radial e foi implementado no código computacional RAIOS 7, resultando em uma economia de tempo computacional de cerca de 90% no cômputo das BRIRs, ou seja, a aurilização pode ser obtida em cerca de 1/10 do tempo.

Como em qualquer procedimento de simulação de acústica de salas há dois blocos de maior custo computacional, a saber: o cálculo dos raios acústicos que chegam a cada receptor; e

o cômputo das respostas impulsivas biauriculares da sala, ao menos um desses blocos beneficiou-se da modelagem via redes neurais, com significativa economia de tempo computacional.

Os resultados comparativos entre as HRIRs/HRTFs filtradas, obtidas pelo método clássico das convoluções e pelo novo modelo das redes neurais artificiais mostraram que as funções são, para todos os efeitos práticos, indistinguíveis, apresentando coeficiente de correlação cruzada normalizada praticamente igual à unidade, tanto no domínio do tempo como no da frequência.

Contudo, como se tratam de aurilizações, o aspecto subjetivo precisa ser considerado e uma métrica envolvendo a intervenção humana se faz necessária. Para tal, foram realizados, em uma única sala, testes de articulação reais e virtuais para quatro posições de recepção (e uma única posição da fonte sonora). Os resultados comparativos entre os índices de articulação reais – medidos diretamente na sala – e os índices de articulação virtuais – obtidos a partir da simulação no código computacional RAIOS 7 – apresentaram diferenças menores que 5%, com média de 3%.

Os testes de articulação deverão ser utilizados como métrica de validação de aurilizações, em diversas salas, com distintos volumes e geometria, de modo a se poder verificar se, efetivamente, as aurilizações geradas pelo código computacional RAIOS 7 mantêm a fidedignidade em situações as mais variadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos estudantes de graduação em engenharia que se voluntariaram a participar dos ensaios reais e virtuais.

REFERÊNCIAS

1. VORLÄNDER, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

2. KLEINER, M.; DALENBÄCK, B.I.; SVESSON, P. Auralization - an overview. *J. audio Eng. Soc.*, 41, p. 861, 1993.
3. BLAUERT, J. *Spatial Hearing*. Cambridge: The MIT Press, 1997.
4. RINDEL, J. The use computer modeling in room acoustics. *Journal of Vibroengineering*, 4(3):41–72, 2000.
5. TENENBAUM, R.A.; CAMILO, T.S.; TORRES, J.C.B. and GERGES, S.Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustic: Part 1 – theoretical and numerical aspects. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, 29(2):211–221, 2007a.
6. BORK, I. Report on the 3rd Round Robin on room acoustical computer simulation - Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4):753–763, 2005.
7. SAVIOJA, L.; SVENSSON, U.P. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(2):708–730, 2015
8. EMBRECHTS, J. Randomly traced sound ray techniques. *Acustica*, 51:285–295, 1982.
9. KULOWSKI, A. Algorithmic representation of the ray tracing technique. *Applied Acoustics*, 18:449–469, 1984.
10. ONDET, M; BARBRY, J.L. Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(2):787–796, 1989.
11. FARINA, A. RAMSETE – a new pyramid tracer for medium and large-scale acoustic problems. *Proceedings of the Euronoise*, Lyon, 1995
12. ALLEN, J.B.; BERKLEY, D.A. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 65, p. 943, 1979.
13. DALENBÄCK, B; KLEINER, M.; SVENSON, P. A macroscopic view of diffuse reflection. *J. audio Eng. Soc.* 42:793–807, 1994.
14. KURZINS, E.; FRICKE, F. The prediction of sound fields in non-diffuse spaces by random walk approach. *J. Sound and Vib.*, 81(4):549–564, 1982.
15. ALARCÃO, D.; BENTO COELHO, J.L.; TENENBAUM, R.A. On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach. *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*, 2000.
16. GARDNER, B.; MARTIN, K. HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, n. 6, pp. 3907– 3908, 1995.
17. BRINKMANN, F.; LINDAU, A.; WEINZIERL, S.; VAN DER PAR, S.; OPDAM, R.; VORLÄNDER, M. The FABIAN head-related transfer function database. DOI: 10.14279/depositonce-5718.2, 2017.
18. MILLS, A. On the minimum audible angle. *J. Acoust. Soc. Am.*, 30:237–246, 1958.
19. KISTLER, D. J.; WIGHTMAN, F.L. A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction. *J. Acoust. Soc. Am.* 91(3), 1637–1647, 1992.
20. TORRES, J.C.B; PETRAGLIA, M.R.; TENENBAUM, R.A. An efficient wavelet based HRTF model for auralization. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(1):108–120, 2004.
21. HU, H.; ZHOU, L.; MA, H.; WU, Z. HRTF personalization based on artificial neural network in individual virtual auditory space. *Applied Acoustics*, 69(2):163–172, 2008.
22. 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.
23. BROOMHEAD, D.; LOWE, D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks. *Complex Systems*, 2:321–355, 1988.
24. LI, L.; HUANG, Q. HRTF personalization modeling based on RBF neural network. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, p. 3707–3710, Vancouver, Canada, 2013.
25. TENENBAUM, R.A.; CAMILO, T.S.; TORRES, J.C.B. and STUTZ, L.T. Hybrid method for numerical simulation of room acoustic: Part 2 – validation of the computational code RAIOS 3. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, 29(2):223–231, 2007b.
26. FERNANDES, K.M.; TENENBAUM, R.A.; STUTZ, L.T. Problema inverso em propagação de ondas em sólidos com aplicação de método híbrido de otimização. Em: *Técnicas de Inteligência Computacional com Aplicações em Problemas Inversos de Engenharia*. Editora Omnipax, Curitiba, pp. 51–66, 2014.
27. RAHIM, M.G., GOODYEAR, C.C. and KLEIJN, W.B. On the use of neural networks in articulatory speech synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 93(2):1109–1121, 1992.
28. HAYKIN, S. *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2009.
29. 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.

30. TENENBAUM, R.A.; TAMINATO, F.O.; MELO V.S.G. Fast auralization using radial basis functions type of artificial neural network techniques. *Applied Acoustics*, 157, 106993, 2020.
31. A Ground Truth for Room Acoustic Simulation. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6726.2>, outubro 2019.
32. HODGSON, M.; YORK, N.; YANG, W.; BLISS, M. Comparison of predicted, measured, and auralized sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using CATT-acoustic and ODEON. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(6):883–890, 2008.
33. MELO, V.S.G.; TENENBAUM, R.A.; NARANJO, J.F.L. A new approach to validate computer modeling auralizations by using articulation indexes. *Acústica & Vibrações*, Vol. 46, pp. 1–8, 2014.
34. POLLOW, M.; BEHLER, G. Variable directivity for platonic sound sources based on spherical harmonics optimization. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(6):1082–1092, 2009.
35. KLEIN, J.; POLLOW, M.; VORLÄNDER, M. Optimized spherical sound source for auralization with arbitrary source directivity. *Proceedings of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics*, p. 56–61, Berlin, 2014.
36. LINDAU, A.; ERBES, V.; LEPA, S.; MAEMPEL, H.J.; BRINKMANN, F.; WEINZIERL, S. A spatial audio quality inventory for virtual acoustic environments (SAQI). *Acta Acustica united with Acustica*, 100(5):984–994, 2014.
37. MELO, V.S.G.; LIMA, P.G.; SANTOS, T.C.; TENENBAUM, R.A. Validação de realidade virtual acústica via testes de articulação em salas ruidosas e reverberantes. *Acústica & Vibrações*, 49, pp. 51–57, 2017.

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 soarão 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.

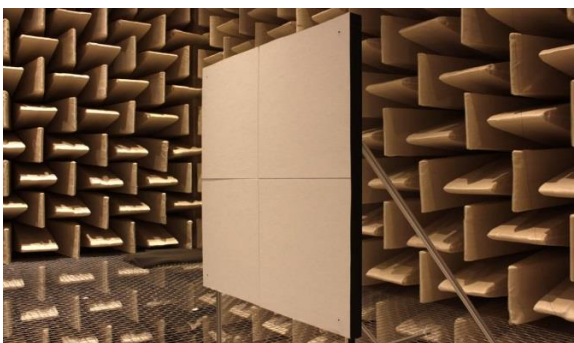


Figura 2: Cenário 2, câmara anecoica com refletor retangular em seu interior (extraída de [10]).

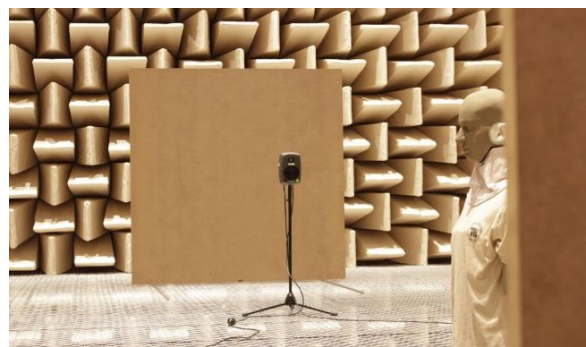


Figura 3: Cenário 3, câmara anecoica com duas placas refletoras (extraída de [10]).



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 m³) 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 m³) 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 m³) 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]).

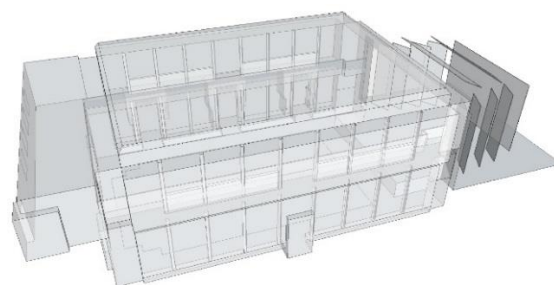


Figura 9: Cenário 10, sala média, em sua perspectiva no software *SketchUp*.



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.

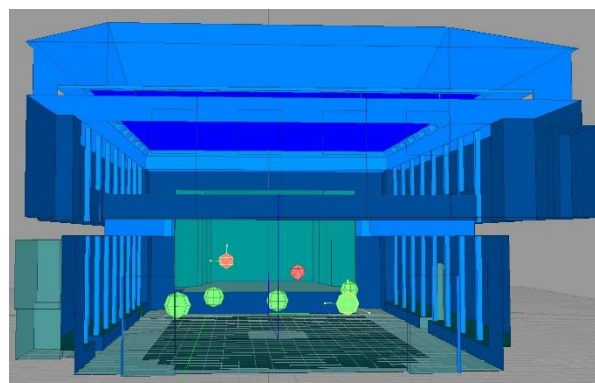


Figura 11: Cenário 10 do RR4 na configuração para o cálculo das RIRs para 10 pares fonte-receptor localizados em seu interior. Visualizado no código RAIOS 7.

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.

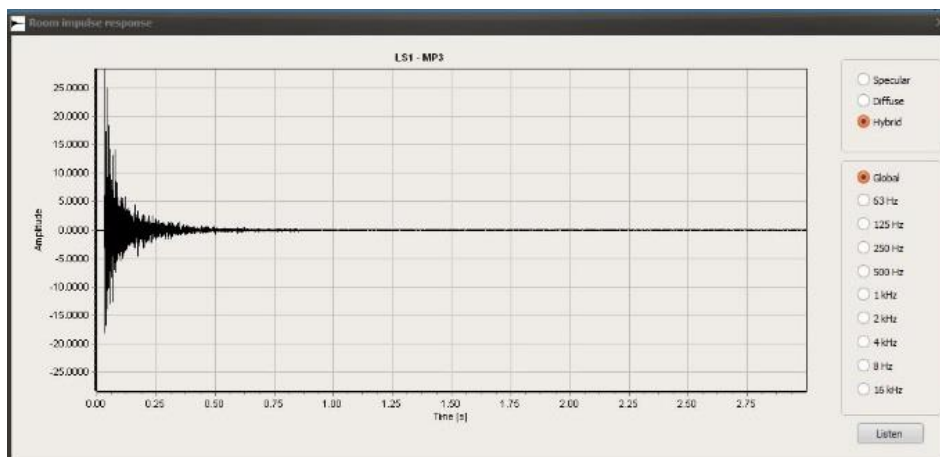


Figura 12: RIR para o par LS1-MP3 no Cenário 10 do RR4.

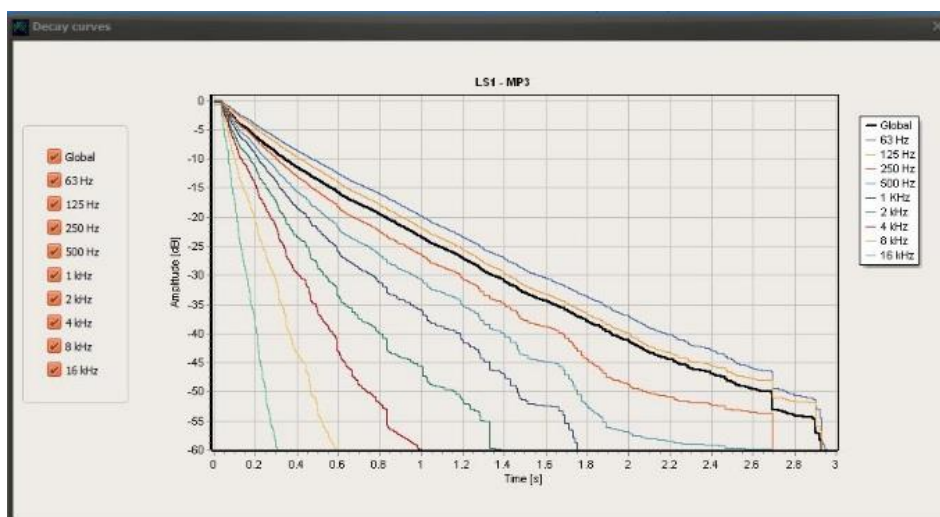


Figura 13: Decaimentos por bandas para o par LS1-MP3, no Cenário 10 do RR4.

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.

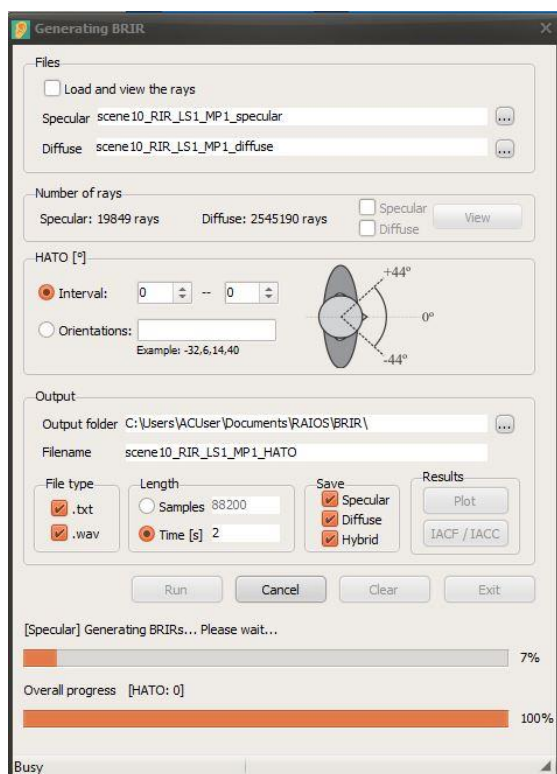


Figura 16: Janela *Generating BRIR*, indicando que está sendo calculada a BRIR para o Cenário 10, par LS1-MP1, com a cabeça apontada para frente.

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.

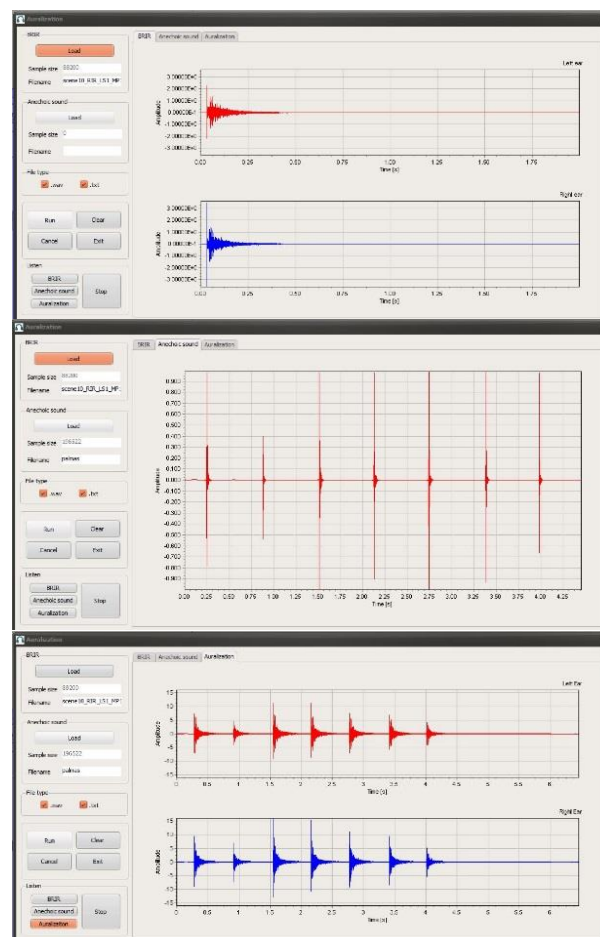


Figura 17: Janela *Auralization*, mostrando os gráficos de uma BRIR (acima), um sinal anecoico de palmas (no meio) e o resultado da convolução, no sinal aurilizado (abaixo).

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.

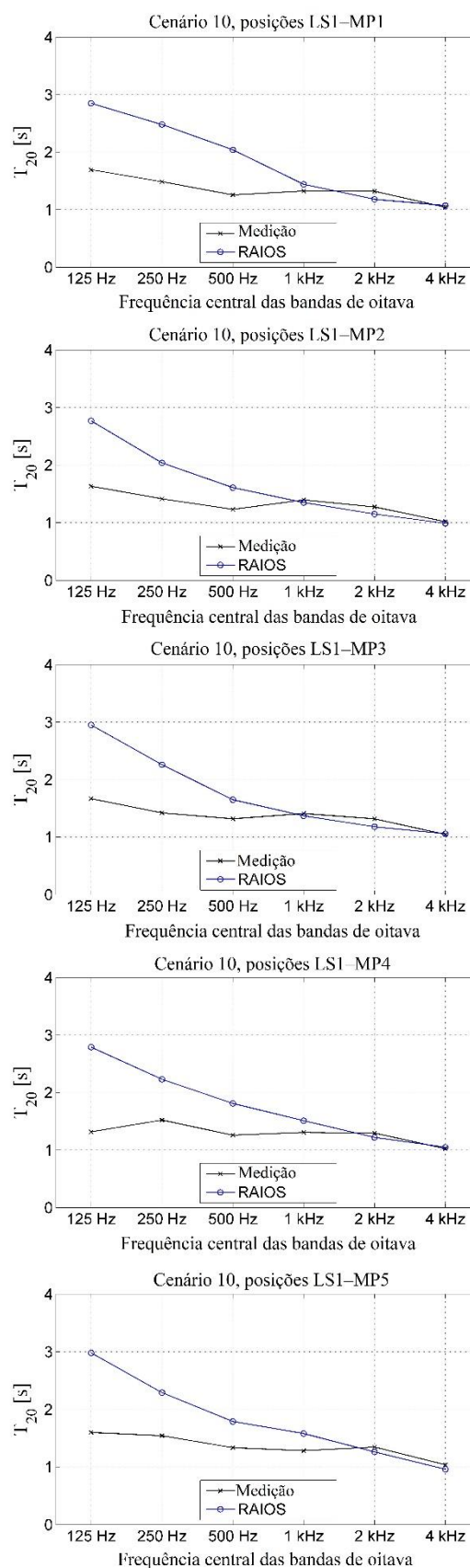


Figura 18: T_{20} por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

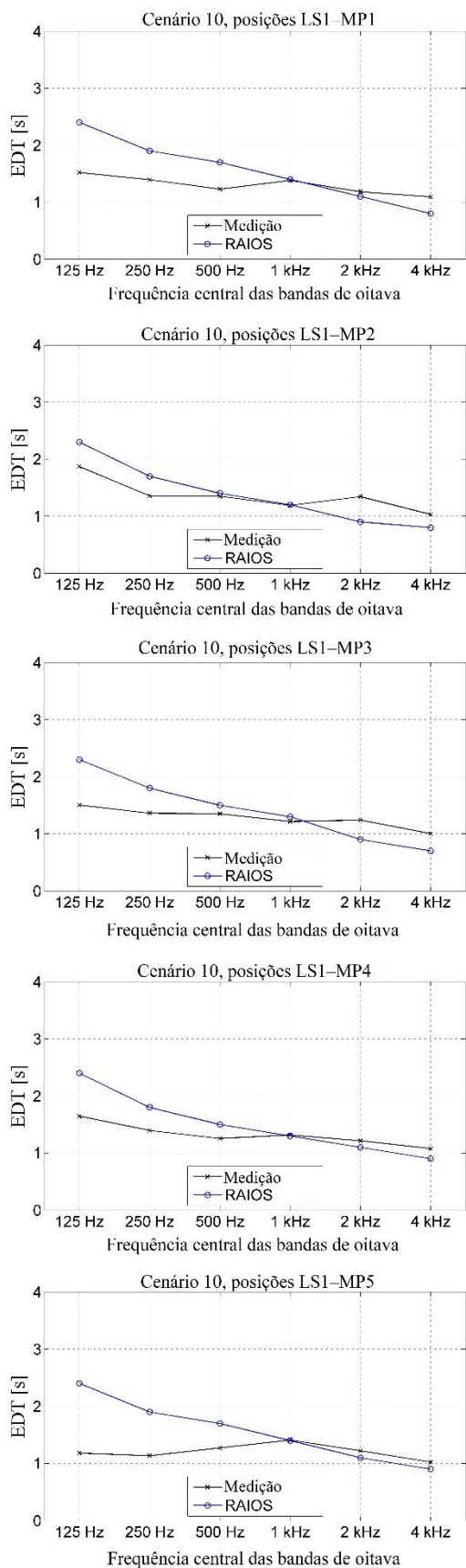


Figura 19: EDT por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

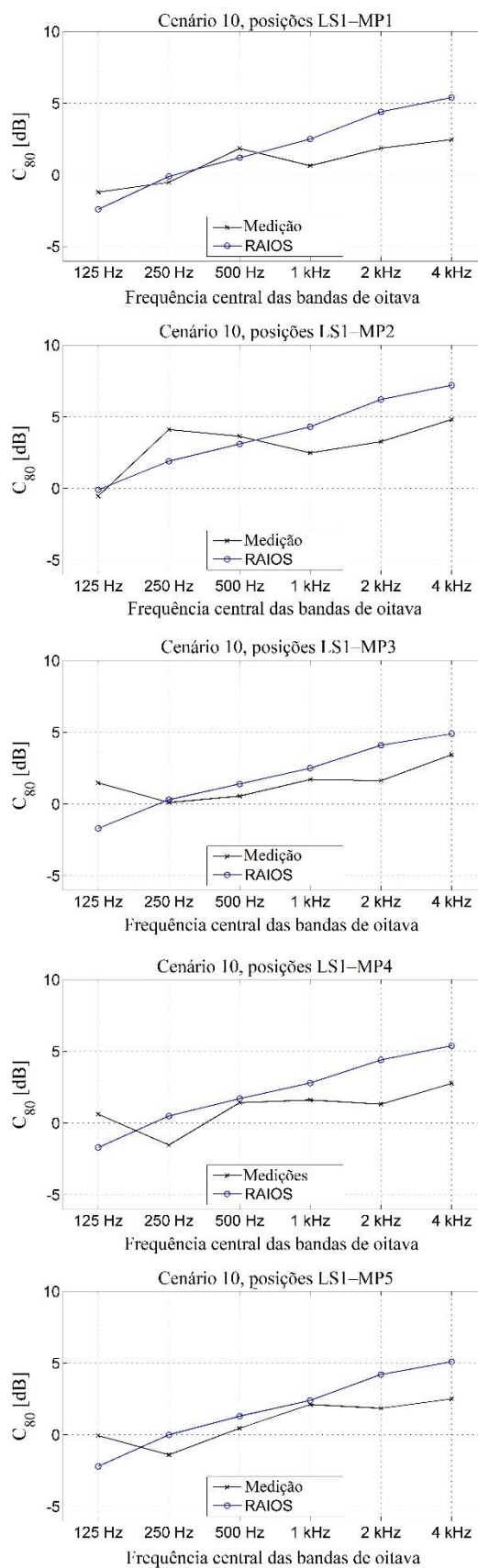


Figura 20: C_{80} por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

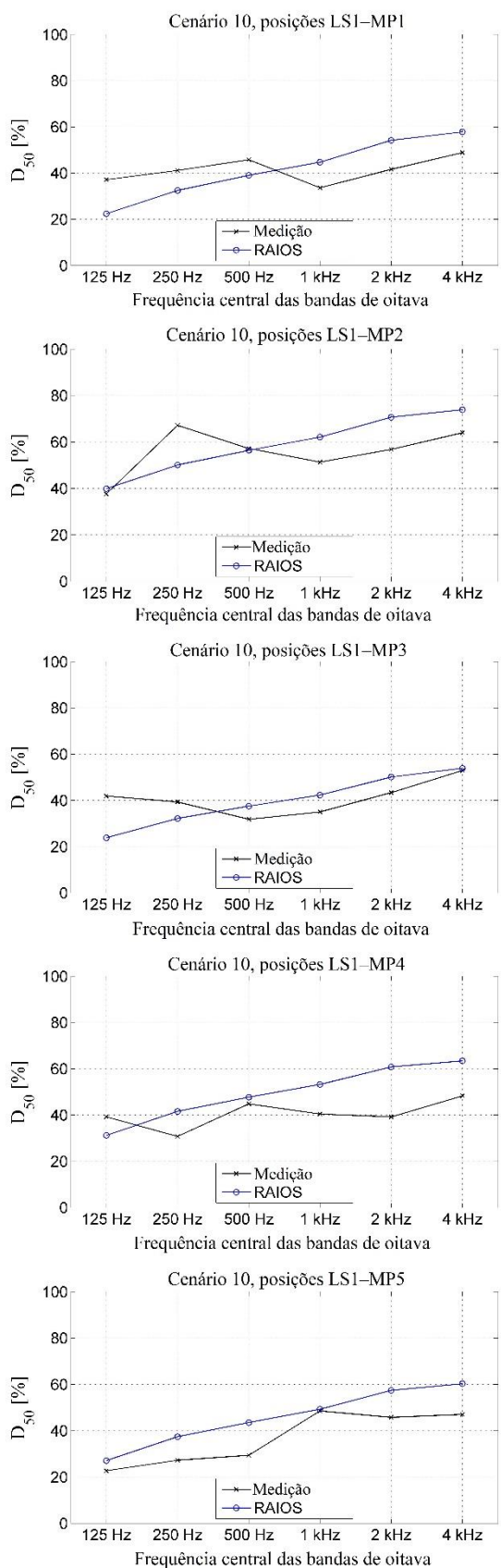


Figura 21: D_{50} por banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz, Cenário 10, pares LS1-MP1 a LS1-MP5.

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.

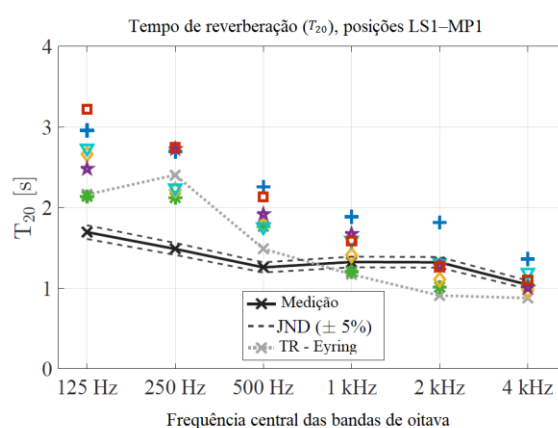


Figura 23: T_{20} para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

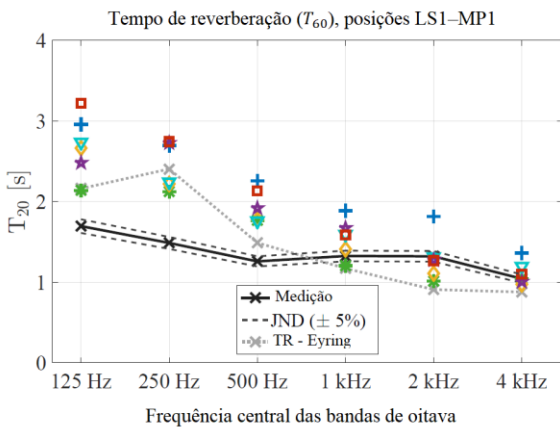


Figura 24: EDT para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

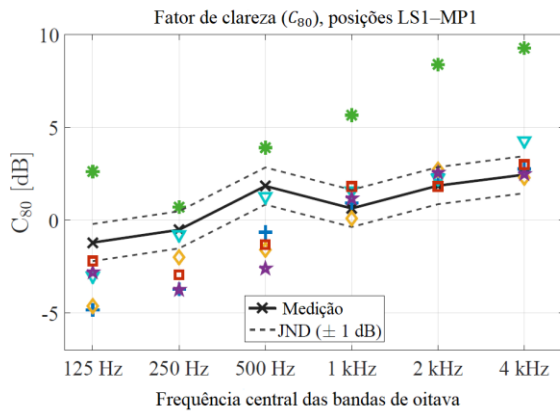


Figura 25: C_{80} para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

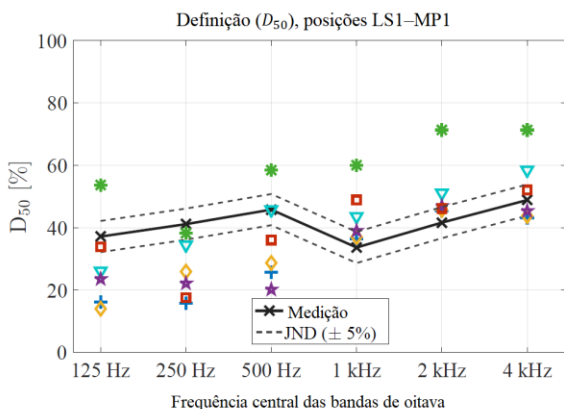


Figura 26: D_{50} para o Cenário 10, par LS1-MP1, simulado por seis participantes do RR4, comparado ao resultado medido (adaptado de [7]).

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. BRINKMASS, 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 auralização*. 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 auralizações 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.

Medição *in situ* de impedância acústica com arranjo de microfones e algoritmos promotores de esparsidade

Malaguetta, T. C.¹; Farias, J. W.¹; Brandão, E. C.²; Masiero, B. S.¹

¹ Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, thiago.malaguetta@gmail.com, johanneswarwick@gmail.com, masiero@unicamp.br

² Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, eric.brandao@eac.ufsm.br

Resumo

O comportamento acústico de salas de aula, teatros, carros e aviões é de suma importância e objeto de constante melhoria. Para podermos simular e prever o comportamento destes espaços é necessário conhecer sua geometria e a impedância acústica dos materiais construtivos. Este trabalho tem como objetivo caracterizar a impedância acústica de materiais construtivos utilizando um arranjo de microfones e técnicas de processamento de arranjo com regularização promotora de esparsidade. Foi elaborado um modelo computacional para simular a reflexão de uma onda por um material poroso infinito e assim avaliar a viabilidade do uso da técnica proposta. Verificou-se que as técnicas promotoras de esparsidade estudadas foram capazes de localizar e segregar o som direto do som refletido, para posterior cálculo da impedância acústica. Os resultados indicam que o método é viável para altas frequências mas apresenta um superdimensionamento da impedância quando comparado aos valores teóricos para médias e baixas frequências.

Palavras-chave: impedância acústica, medição *in situ*, arranjo de microfones, algoritmos promotores de esparsidade.

PACS: 43.58.Bh, 43.20.Ye, 43.60.Fg, 43.60.-c.

In situ acoustic impedance measurement through microphone arrays and sparsity promoting algorithm

Abstract

The acoustic behavior of classrooms, theaters, cars and airplanes is of paramount importance and subject to constant improvement. In order to simulate and predict the behavior of these objects or spaces it is necessary to know their geometry and the acoustic impedance of the building materials used. This work aims to characterize the acoustic impedance of construction materials using a microphone array and array processing techniques with sparsity promoting regularization. A computational model was developed to simulate the reflection of a wave by an infinite porous material and to evaluate the viability of the proposed technique. It was verified that the proposed sparsity promoting techniques were able to locate and segregate the direct sound of the reflected sound, for later calculation of the acoustic impedance. The results indicate that the method is viable for high frequencies but presents an overestimation of the impedance values when compared to the theoretical values for medium and low frequencies.

Keywords: acoustic impedance, *in situ* measurements, microphone arrays, sparsity promoting algorithms.

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandezas físicas que permitem caracterizar a resposta acústica dos materiais é a sua impedância acústica, e a sua medição ganhou importância nos últimos anos devido a popularização de técnicas de simulação acústica e auralização, que têm a impedância de superfície das paredes como um dos seus parâmetros de entrada [1].

O método padrão mais utilizado para a caracterização da impedância acústica é o tubo de impedância [2]. Este método possui o inconveniente de que as amostras precisam ser cortadas para que apenas parte delas sejam inseridas na terminação de um tubo. Uma outra forma padronizada de caracterizar um material é expondo-o a um campo sonoro dentro de uma câmara reverberante [3]. No entanto, este método permite a caracterização apenas do coeficiente de absorção por incidência difusa do material e não de sua impedância. Busca-se então uma forma de realizar a medição da impedância acústica *in situ*, ou seja, com o material intacto e onde o material é aplicado, o que permite examinar os efeitos de montagem de amostra (por exemplo, compressão), os efeitos do tempo (por exemplo, umidade e acúmulo de sujeira), os efeitos do ângulo de incidência da onda sonora [4], bem como caracterizar diversos tipos de ambientes [5] e cavidades (por exemplo, automóveis e aviões) [6].

Os principais métodos de medição *in situ* de impedância acústica são classificados e discutidos em [7]. Estes métodos variam amplamente quanto aos sensores usados nessa tarefa. Um dos métodos, por exemplo, adapta um tubo de impedância para ser usado *in situ*, de forma a caracterizar a pressão sonora e a velocidade de partícula no final do tubo onde está a amostra [8]. Outros métodos se utilizam de um microfone e aplicam diversas técnicas de processamento de sinais para realizar a medição do coeficiente de absorção [9] ou coeficiente de reflexão [10] por meio da relação entre a pressão incidente e refletida no ambiente em estudo.

O uso de arranjo de microfones está dentre as

formas mais inovadoras de medição de impedância acústica, visto que permite realizar uma estimativa do campo acústico em uma dada região do espaço, segregando a onda incidente da onda refletida e estas duas das demais ondas interferentes. Configurações mais simples de medição utilizam arranjos lineares de microfones [11], enquanto configurações mais complexas usam arranjos planos [12] ou esféricos [13].

Embora a popularidade de arranjos de microfones tenha aumentado consideravelmente nas últimas décadas, sua aplicação para medição de impedância acústica ainda é rara. Isso pode ser explicado, em parte, pelo fato de que os arranjos são, em geral, pequenos se comparados ao comprimento de onda sob análise e contêm um número relativamente reduzido de microfones, resultando em baixa resolução espacial com o uso de técnicas clássicas como o *delay-and-sum beamformer* (DAS). Em processamento de arranjo de antenas é comum o uso de técnicas como o *beamformer* de Capon, também conhecido por *minimum variance distortionless response* (MVDR) *beamformer*, para a melhoria da resolução espacial [14], mas esta técnica apresenta instabilidade para sinais de banda larga.

Uma possível maneira de se aumentar a resolução espacial do arranjo sem, contudo, aumentar o número de sensores é com o uso de algoritmos promotores de esparsidade. Estes algoritmos se baseiam no conhecimento *a priori* de que o campo acústico de interesse é composto por poucas frentes de onda, o que costuma ser um modelo válido para caracterizar o problema de medição de impedância acústica *in situ*. O método *sparse learning via iterative minimization* (SLIM) [15], por exemplo, fornece uma localização mais acurada das fontes sonoras e uma melhor separação das ondas incidente e refletida. No entanto, esta técnica apresenta distorções no espectro do sinal recuperado que inviabilizaria a medição acústica. Neste trabalho o método RELAX [16] é utilizado para recuperar os sinais incidente e refletido após a determinação dos seus ângulos de incidência pelo algoritmo SLIM.

Estes algoritmos são testados em um ambi-

ente de simulação. O campo acústico gerado por uma fonte pontual e amostrado por um arranjo de sensores ideais foi modelado considerando a presença de uma amostra localmente reativa [17] de dimensões infinitas.

Este documento está estruturado da seguinte maneira: primeiro é feita uma revisão do conceito de impedância acústica seguida de uma revisão sobre o uso de arranjos de microfones como filtros espaciais. Os métodos clássicos de *beamforming* são descritos e em seguida é apresentado o método promotor de esparsidade para sinais de banda larga WB-SLIM e o método RELAX. Em seguida é apresentado o arcabouço de simulação para a reflexão de uma onda sonora por uma amostra localmente reativa de dimensões infinitas. Por fim, apresentam-se os resultados da simulação, discutindo os resultados obtidos.

2. IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

A impedância acústica característica (Z_c) é intrínseca de um meio material e descreve a resistência ao fluxo sonoro imposta a uma onda sonora por este meio. Z_c é definida como a razão entre \tilde{p} (amplitude complexa da pressão sonora) e \tilde{v}_n (amplitude complexa da velocidade de partícula) para uma onda plana em campo livre:

$$Z_c(\omega) = \frac{\tilde{P}(\omega)}{\tilde{V}_n(\omega)}. \quad (1)$$

A superposição de diferentes materiais e meios acarreta em uma alteração da impedância percebida por uma onda na superfície do material. A impedância de superfície, Z_s , é a razão entre a amplitude complexa da pressão pela amplitude complexa da velocidade de partícula medida na superfície que separa dois meios; além disso, a velocidade de partícula deve ser mensurada na direção normal à interface de separação. É esta impedância de superfície Z_s que é de interesse quando estuda-se o comportamento de uma onda sonora que se propaga pelo ar e atinge uma superfície composta por um dado material.

Uma onda plana monocromática de frequência

ω , que se propaga no ar e atinge uma superfície infinita composta por um material de impedância de superfície Z_s , terá, por causa da mudança de impedância acústica, parte de sua energia refletida para o ar e outra parte transmitida para o material. Sendo $\tilde{P}_i(\omega)$ a amplitude complexa da pressão sonora incidente e $\tilde{P}_r(\omega)$ a amplitude complexa da pressão sonora refletida sobre a superfície da amostra, podemos definir o coeficiente de reflexão

$$R(\omega) = \frac{\tilde{P}_r(\omega)}{\tilde{P}_i(\omega)}, \quad (2)$$

e também o coeficiente de absorção

$$\alpha(\omega) = 1 - |R(\omega)|^2. \quad (3)$$

Verifica-se que a impedância acústica na superfície de um material [17] pode ser descrita em função do coeficiente de reflexão como

$$Z_s(\omega, \theta) = \frac{Z_0}{\cos(\theta)} \frac{1 + R(\omega)}{1 - R(\omega)}, \quad (4)$$

em que θ é o ângulo de incidência da onda plana na superfície e $Z_0 = \rho_0 c_0$ é a impedância característica do ar (ρ_0 é a densidade do ar e c_0 a velocidade do som no ar) [17].

Portanto, assumindo a incidência de uma onda plana, é possível calcular a impedância de superfície de um material usando o coeficiente de reflexão, que por sua vez pode ser estimado pela razão entre onda incidente e refletida. Por esta razão, estuda-se a seguir métodos capazes de separar as componentes incidentes e refletidas de um campo sonoro.

3. ARRANJO DE MICROFONES

A combinação dos sinais extraídos de um conjunto de microfones distribuídos no espaço permite a realização de um *filtro espacial*, como mostrado na Figura 1. Este sistema, conhecido por *beamformer*, permite reforçar sinais vindos de uma dada direção, consequentemente reduzindo ruído e interferência provenientes de ou-

tras direções. A seguir apresentamos as técnicas clássicas *beamformer* de Bartlett e DAS assim como um método mais moderno, o SLIM, em sua versão para sinais de banda larga, o WB-SLIM.

Todas as técnicas descritas a seguir são adaptadas ao problema envolvendo sinais de banda larga. Neste caso, um bloco do sinal no tempo $x(t)$ é transformado de forma a ser representado como um conjunto de pressões complexas obtidas pelo arranjo em diferentes frequências. Nos métodos clássicos, o problema de imageamento é dividido em diversos subproblemas de banda estreita, que são solucionados de forma independente. Em contraste a técnica promotora de esparsidade WB-SLIM combina as informações de frequência para refinar o resultado de forma global na frequência.

3.1 Bartlett *Beamforming* e DAS

Considera-se uma fonte sonora posicionada em campo distante emitindo sinais de banda larga, que serão captados por um arranjo de M microfones. Os sinais dos microfones são amostrados no tempo e usa-se um bloco de $2(L + 1)$ amostras para, por meio da transformada rápida de Fourier, extrair L componentes de frequência, já que as frequências negativas, nula e de Nyquist podem ser descartadas. O sinal dos microfones na presença do ruído aditivo é expresso por

$$\mathbf{y}_l = \mathbf{v}_l(\mathbf{u}_s)x_{s,l} + \mathbf{n}_l \quad (5)$$

em que $\mathbf{y}_l \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ representa o vetor de pressão complexa medida em cada microfone para a faixa de frequência l , $\mathbf{v}_l(\mathbf{u}_s) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é o vetor de direção que introduz para cada microfone os atrasos associados a uma onda plana que atinge o arranjo da direção \mathbf{u}_s [18], $x_{s,l} \in \mathbb{C}$ representa a amplitude complexa do sinal irradiado pela fonte s na banda de frequência l e $\mathbf{n}_l \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ representa o ruído aditivo em cada microfone na banda de frequência l .

Em um filtro espacial a estimativa do sinal emitido por uma suposta fonte na direção \mathbf{u}_n e na

frequência l é dada por

$$\hat{x}_{n,l} = \mathbf{w}_l(\mathbf{u}_n)^H \mathbf{y}_l, \quad (6)$$

em que $\mathbf{w}_l(\mathbf{u}_n) = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M]^T$ é um vetor de coeficientes complexos do filtro espacial ajustado para a direção \mathbf{u}_n e H indica o *hermitiano* ou transposto conjugado do vetor.

O Bartlett *beamforming* calcula os coeficientes $\mathbf{w}_l(\mathbf{u}_n)$ do filtro espacial de modo a maximizar a energia da saída quando o arranjo é excitado por uma onda plana vinda justamente da direção de busca escolhida, ou seja, quando $\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_s$. De acordo com [18], a solução deste problema de otimização resulta em

$$\mathbf{w}_{BF}(\mathbf{u}_n) = \frac{\mathbf{v}_l(\mathbf{u}_n)}{\|\mathbf{v}_l(\mathbf{u}_n)\|}. \quad (7)$$

Verifica-se que o *beamformer* de Bartlett atua aplicando um atraso nos sinais captados pelo arranjo, de modo a anular a variação de fase nos microfones do sinal que chega da direção de interesse, permitindo uma combinação construtiva destes sinais. Este tipo de técnica é considerada como determinística, dado que os pesos do filtro espacial não dependem de informações estatísticas do sinal, sendo função apenas do vetor de direção. Observa-se que o comportamento do *beamformer* de Bartlett, quando convertido para o domínio do tempo, implica em um atraso em cada microfone, de forma a alinhar os sinais vindos da direção de interesse. Esta implementação no domínio do tempo é conhecida por *delay and sum* ou DAS. Após alinhados temporalmente, soma-se os sinais de todos os microfones para gerar um sinal de saída reforçado, enquanto que sinais provenientes de outras direções não serão alinhados no tempo e acabarão atenuados. A Figura 1 ilustra o comportamento geral do DAS (considerando sinais no domínio do tempo).

Apesar da praticidade, estas técnicas possuem limitações que afetam a qualidade da imagem acústica obtida, que varia de acordo com a componente em frequência utilizada durante o processo de imageamento. Este fenômeno está diretamente relacionado com a diretividade do arranjo. Para ilustrar este fenômeno será considerado um arranjo linear uniforme (ULA) com 10

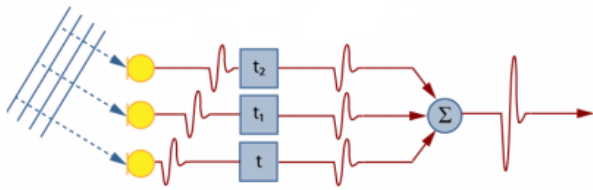
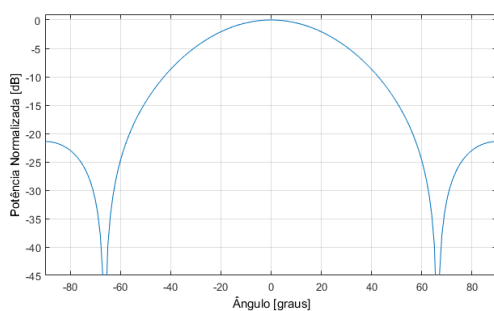
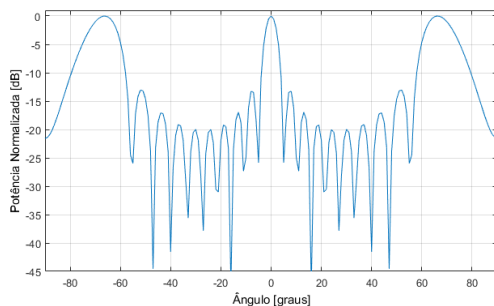


Figura 1: Exemplo do processo de *beamforming* clássico. Fonte: Adaptado de [19].

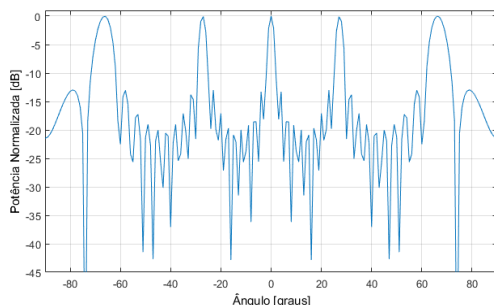
elementos, e espaçamento de 25 cm entre cada sensor. A diretividade foi então calculada no intervalo de $\theta = -90^\circ$ a 90° , para três frequências distintas, como mostrado na Figura 2.



(a) $f = 150$ Hz



(b) $f = 1500$ Hz



(c) $f = 3000$ Hz

Figura 2: Padrão de feixe para uma ULA operando com frequência de 150 Hz, 1500 Hz e 3000 Hz.

Em baixas frequências, como ilustra a Figura 2a,

o lóbulo principal é bastante largo e quase não se observam os lóbulos secundários. Isto implica que fontes sonoras próximas serão praticamente indistinguíveis nestas frequências. Neste exemplo observa-se que é praticamente impossível distinguir entre duas ou mais fontes quando estas estiverem em direções na faixa de $\pm 20^\circ$ da direção de visada. À medida em que a frequência é elevada, a largura do lóbulo principal se reduz, resultando em um imageamento mais preciso, entretanto os lóbulos laterais se tornam mais proeminentes, o que afeta a qualidade da imagem resultante. A Figura 2b ilustra o efeito desta variação da frequência na formação dos lóbulos. Já em altas frequências, como ilustra a Figura 2c, verifica-se que a presença de diversos lóbulos laterais com elevadas amplitudes, resultado do fenômeno de *aliasing* espacial causado pela ambiguidade da informação de fase, o que afeta a confiabilidade da localização das fontes. Em suma, existe uma relação direta entre o comprimento do arranjo e o comprimento de onda que este arranjo pode analisar com boa resolução e sem artefatos.

Para contornar este problema sugere-se então a técnica WB-SLIM, que utiliza como parâmetro de entrada o resultado do *beamformer* de Bartlett para gerar uma estimativa mais refinada da direção de chegada dos sinais que atingem o arranjo, explorando para isso a estrutura esparsa do problema que vem do fato de termos sons vindos de apenas duas direções (incidente e refletido) dentre um número muito grande de possíveis direções de chegada.

3.2 WB-SLIM

Em geral, para um número fixo de sensores, os métodos clássicos apresentam baixa resolução em baixas frequências e a presença de diversos lóbulos laterais em altas frequências. Técnicas promotoras de esparsidade podem ser usadas para tentar refinar a resolução da imagem acústica, também eliminando os indesejados lóbulos laterais.

O WB-SLIM utiliza o mesmo modelo de sinal de banda larga usado para as técnicas clássicas,

apresentado na Equação (5). Intuitivamente, o WB-SLIM funciona usando a soma energética em frequência da estimativa de energia por direção como ponderação para uma nova estimativa, repetindo este procedimento iterativamente. Ou seja, a partir da segunda iteração é dado maior importância a direções que previamente se definiu como tendo maior energia, refinando, com isso, a resolução da estimação. Em comparação com outras técnicas promotoras de esparsidade, o WB-SLIM possui a vantagem de não exigir ajuste de parâmetros (como, por exemplo, a energia do ruído de fundo), removendo a necessidade de conhecimento prévio no ajuste das configurações.

A Equação (5) pode ser reescrita como

$$\mathbf{y}_l = \mathbf{A}_l \mathbf{x}_l + \mathbf{n}_l, \quad (8)$$

em que $\mathbf{A}_l \in \mathbf{C}^{M \times N}$ representa a matriz que concatena todos vetores de direção associados com as direções de busca no espaço e $\mathbf{x}_l \in \mathbf{C}^{N \times 1}$ representa o vetor dos possíveis sinais nas direções de busca, sendo N é o número de direções de busca. A técnica SLIM, inicialmente apresentada em [20], expressa uma solução para um problema de minimização utilizando norma ℓ_q , em que $0 < q \leq 1$, ou seja, ela busca a solução que minimize a energia do erro enquanto promove, ao mesmo tempo, a esparsidade do vetor \mathbf{x}_l . A suposição de esparsidade implica que apenas alguns valores de \mathbf{x}_l serão diferentes de zero, já que se assume que o campo total é gerado por apenas K fontes sonoras e $K \ll N$.

Em [15] propõe-se duas variações para o SLIM abordando sinais de banda larga: WB-SLIM-0 que busca minimizar uma aproximação da norma ℓ_0 e WB-SLIM-1 que busca minimizar uma aproximação da norma ℓ_1 . A principal diferença entre os dois métodos está na relação entre esparsidade e robustez do resultado. O primeiro algoritmo produz resultados mais esparsos, entretanto perde eficiência em situações de baixa relação sinal-ruído. Esta pesquisa focará na avaliação do WB-SLIM-0, que busca

minimizar a seguinte função custo

$$J_{\text{WB-SLIM-0}} = LM \log \eta + \frac{1}{\eta} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{y}_l - \mathbf{A}_l \mathbf{x}_l\|^2 + L \sum_{n=1}^N \log p_n + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \frac{|x_{n,l}|^2}{p_n}, \quad (9)$$

em que η representa a energia do ruído e p_n um elemento da diagonal da matriz de covariância de \mathbf{x}_l . Note que o segundo termo da Equação (9) busca minimizar a energia do erro de estimação enquanto o terceiro termo da Equação (9) promove a esparsidade de p_n utilizando o somatório do logaritmo de p_n . Visto que p_n é definido como a energia espectral média de x_n , este termo consequentemente também promove a esparsidade de \mathbf{x} no espaço.

O problema de otimização da Equação (9) pode ser resolvido com o uso da técnica de minimização cíclica [21], na qual cada resultado é obtido por meio da simplificação do problema de otimização, derivando determinado parâmetro e assumindo os restantes como conhecidos. A partir deste ponto é possível obter soluções ótimas para p_n , \mathbf{x}_l e η . As equações resultantes e o processo de cálculo do algoritmo WB-SLIM-0 está resumido na Tabela 1.

Conforme mencionado por [15], quando $p_n \rightarrow 0$ ou $\eta \rightarrow 0$, o valor de $J_{\text{WB-SLIM-0}}$ pode resultar em $-\infty$ para certos valores de \mathbf{x}_l . Portanto, a função custo descrita pela Equação (9) não possui um mínimo global para este conjunto de parâmetros sem o uso de restrições. Para contornar este problema, foi utilizada a variável ε como um método de controle, sendo esta definida como um pequeno valor positivo (nos exemplos práticos foi utilizado um valor de $\varepsilon = 10^{-16}$). Durante as iterações do WB-SLIM-0 são realizadas verificações, e as variáveis mencionadas anteriormente são mantidas com o valor de ε caso ultrapassem este limiar durante a minimização.

Tabela 1: Algoritmo para cálculo do WB-SLIM-0, em que L é quantidade de componentes de frequência, M a quantidade de microfones e N a quantidade de pontos de visada.

Inicializar o algoritmo estimando $x_{n,l}$ e η através do *Delay-and-Sum*:

$$x_{n,l}^{(0)} = \mathbf{v}_l(\mathbf{u}_n)^H \mathbf{y}_l / \|\mathbf{v}_l(\mathbf{u}_n)\|^2, \text{ para } n = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L;$$

$$\eta^{(0)} = \max \left\{ \frac{1}{10LM} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{x}_l^{(0)}\|^2, \varepsilon \right\}$$

Repetir os seguintes cálculos para $t = 0, 1, 2, \dots$:

$$p_n^{(t+1)} = \max \left\{ \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |x_{n,l}^{(t)}|^2, \varepsilon \right\}, \text{ para } n = 1, \dots, N;$$

$$\mathbf{x}_l^{(t+1)} = \mathbf{P}^{(t+1)} \mathbf{A}_l^H (\mathbf{A}_l \mathbf{P}^{(t+1)} \mathbf{A}_l^H + \eta^{(t)} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{y}_l, \text{ para } l = 1, \dots, L;$$

$$\eta^{(t+1)} = \max \left\{ \frac{1}{LM} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{y}_l - \mathbf{A}_l \mathbf{x}_l^{(t+1)}\|^2, \varepsilon \right\}$$

até atingir a convergência.

Fonte: Adaptado de [15].

3.3 RELAX

De acordo com [15] o algoritmo WB-SLIM é capaz de refinar a estimativa da energia por ângulo de incidência. No entanto, ele acaba distorcendo o espectro do sinal recuperado. Para evitar esta distorção os autores propõem usar o WB-SLIM para determinar a quantidade e a direção das fontes que constituem o campo sonoro e usar o algoritmo RELAX [16] para, de posse das informações de quantidade e direção das fontes sonoras, estimar a forma de onda do sinal proveniente de cada direção.

O algoritmo RELAX busca minimizar o seguinte problema não-linear:

$$\min_{(\mathbf{u}_k, x_{k,l})} \sum_{l=1}^L \left\| \mathbf{y}_l - \sum_{k=1}^K \mathbf{v}_l(\mathbf{u}_k) x_{k,l} \right\|^2. \quad (10)$$

Sabendo o número de fontes K , o algoritmo pode ser inicializado com os valores de \mathbf{u}_k e $x_{k,l}$ obtidos pelo WB-SLIM e ser resolvido, como o SLIM, usando uma minimização cíclica. Ou seja, fixa-se os valores de \mathbf{u}_k e $x_{k,l}$ para todas as direções menos uma, recaindo desta forma no problema linear:

$$\min_{(\mathbf{u}_k, x_{k,l})} \sum_{l=1}^L \left\| \hat{\mathbf{y}}_{l,k} - \mathbf{v}_l(\mathbf{u}_k) x_{k,l} \right\|^2, \quad (11)$$

em que

$$\hat{\mathbf{y}}_{l,k} = \mathbf{y}_l - \sum_{i \neq k} \mathbf{v}_l(\mathbf{u}_i) x_{i,l}. \quad (12)$$

A Equação (11) pode ser solucionada agora usando o *beamformer* de Bartlett, i.e., utilizando a Equação (7) para determinar a direção \mathbf{u}_i de máxima energia¹ e então calcular $x_{i,l}$ para esta direção. O algoritmo RELAX então atualiza as demais fontes de forma cíclica até atingir o critério de parada, que pode ser, por exemplo, que a norma da diferença entre duas estimações consecutivas atingiu um limiar pré-definido.

4. MODELAGEM NUMÉRICA DE UM MATERIAL POROSO

Para a simulação do uso de um arranjo de microfones para a determinação da impedância acústica de um material construiu-se um modelo matemático capaz de simular diversas situações de disposição da fonte e do arranjo de sensores em relação a uma amostra de material poroso de tamanho infinito. Desta forma, será possível avaliar a influência dos algoritmos de filtragem espacial no resultado das medições.

¹Em [15] sugere-se o uso do algoritmo de Nelder–Mead, implementado pela função `fminsearch` no Matlab, para determinar o ponto de máximo na curva de energia por direção de incidência.

4.1 Modelagem geométrica

De acordo com [17], tem-se uma fonte, denominada de fonte real, que gera a pressão incidente sobre a amostra e uma segunda fonte, denominada fonte-imagem, que gera a pressão refletida pelo material. Utilizando como referencial o plano que contém a amostra, a posição da fonte-imagem é simétrica à posição da fonte real em relação ao plano da amostra. Esse esquema é ilustrado na Figura 3.

A Figura 3 indica a distância da fonte real ao microfone r_1 , a distanciada fonte-imagem ao microfone r_2 , a distância horizontal entre a fonte real e um microfone r , a distância da fonte real à superfície sob teste h_s e a distância de cada microfone à superfície sob teste h_r . Essas distâncias são mantidas fixas para cada ensaio. As relações entre as distâncias da Figura 3 podem ser obtidas pelas seguintes equações:

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_s - h_r)^2} \quad \text{e} \quad (13)$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h_s + h_r)^2}. \quad (14)$$

4.2 Modelo acústico de uma amostra localmente reativa

Uma amostra localmente reativa possui alto índice de refração, fazendo com que o ângulo de refração varie muito pouco com o ângulo de incidência da onda sobre a amostra. Com isto, a impedância de superfície da amostra praticamente independe do ângulo de incidência da

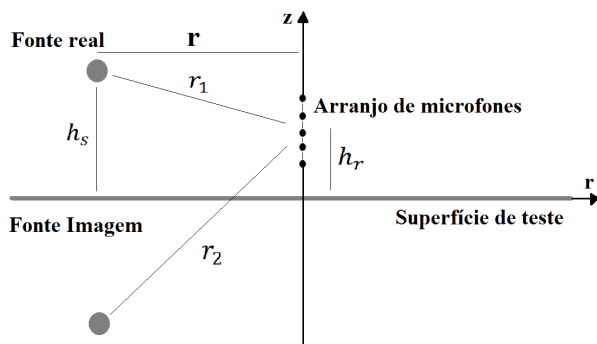


Figura 3: Modelo de reflexão sonora de ondas esféricas sobre uma superfície infinita de material localmente reativo.

onda. Em [17] os autores mostram que a pressão sonora resultante da incidência e reflexão de uma onda esférica sobre uma amostra localmente reativa de dimensões infinitas é dada por

$$p = \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} - \left(\frac{2k\rho_0c_0}{Z_s} \int_0^\infty e^{-\frac{k\rho_0c_0}{Z_s}q} \frac{e^{-jk\sqrt{r^2+(h_s+h_r-jq)^2}}}{\sqrt{r^2+(h_s+h_r-jq)^2}} dq \right), \quad (15)$$

em que o primeiro termo é referente à onda incidente, o segundo termo à onda refletida (fonte-imagem) e o terceiro termo se refere à absorção e difração da onda esférica na amostra. É importante notar que este modelo requer o conhecimento da impedância de superfície para o cálculo da pressão total. Para calcular a impedância de superfície foi utilizado o modelo em [22] dado por

$$Z_c = \sqrt{K\rho_c}, \quad (16)$$

$$k_1 = \omega\sqrt{\rho_c/K}, \quad (17)$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\gamma - \frac{\gamma-1}{\beta}}, \quad (18)$$

$$\rho_c = \rho_0\alpha_\infty\beta \quad \text{e} \quad (19)$$

$$\beta = 1 + \frac{\sigma\phi}{j\alpha_\infty\rho_0B_2\omega} \sqrt{1 + \frac{4j\alpha_\infty^2\rho_0B_2v\omega}{\sigma^2\wedge^2\phi^2}}, \quad (20)$$

em que $\gamma = C_p/C_v$ é a razão de calores específicos do gás a pressão constante C_p e a volume constante C_v , P_0 é a pressão atmosférica, α_∞ é a tortuosidade (desvio da orientação dos poros em relação à direção de propagação no interior do material), σ é a resistividade ao fluxo (facilidade de um fluxo de ar em penetrar e atravessar uma camada do material poroso), ϕ é a porosidade do material (definido como a razão entre o volume total dos poros e o volume total ocupado pelo material), B_2 é o número de Prandtl (relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido), \wedge é o comprimento característico (razão da média entre o volume e a área superficial dos poros do material) e v é a

viscosidade do ar.

Esse modelo resulta na impedância característica da amostra (Z_c) e seu número de onda (k_1), que é dependente das propriedades intrínsecas do material. A impedância de superfície da amostra pode então ser calculada através da equação

$$Z_s = -j \frac{Z_c}{\cos(\theta_r)} \cot(k_1 \cos(\theta_r)d), \quad (21)$$

em que o termo d representa a espessura da amostra, θ_r é o ângulo de refração que depende do número de onda no ar (k_0) e na amostra (k_1) segundo a equação

$$n = \frac{c_0}{c_1} = \frac{k_1}{k_0} = \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta_r)}. \quad (22)$$

Quando o índice de refração da amostra se torna suficientemente grande ($c_0 \gg c_1$), o ângulo de refração da amostra se torna pequeno, fazendo com que $\cos \theta_r \approx 1$, ou seja, tem-se uma amostra localmente reativa.

5. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados do cálculo da impedância de superfície de uma amostra porosa por meio de medição com arranjo de microfones e processamento com regularização promotora de esparsidade. Para os resultados a seguir uma fonte pontual foi posicionada a 1 m da amostra e um arranjo linear de quatro microfones foi posicionado na linha perpendicular entre a fonte pontual e o plano da amostra, ou seja, $r = 0$ m. O arranjo possuía distribuição não-redundante [23] com comprimento total de 30 cm e o microfone posicionado mais próximo da amostra estava posicionado a 20 cm de sua superfície, logo $h_r = [0,5 \ 0,4 \ 0,25 \ 0,2]$ m.

Escolheu-se para a simulação uma amostra cujos parâmetros físicos foram também simulados em [17], e são listados na Tabela 2 para facilitar a reprodução dos resultados. A impedância de superfície dessa amostra foi calculada com a Equação (21) para uma espessura da amostra de $d = 50$ cm. A Figura 4 ilustra o resultado obtido,

Tabela 2: Parâmetros físicos da melamina usados para simulação da sua impedância de superfície. Extraídos de [17].

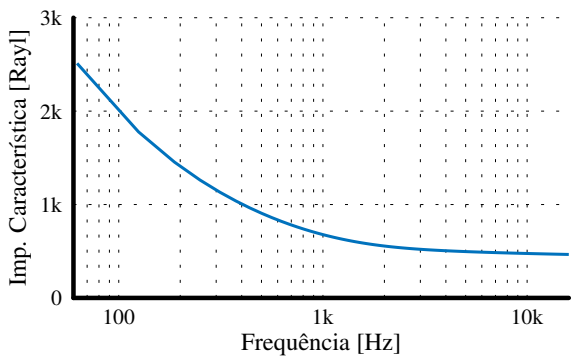
| | |
|-----------------|-------------------------------|
| γ | 1,4 |
| P_0 | 10^5 [Pa] |
| α_∞ | 1 |
| σ | 25000 [N·s/m ⁴] |
| ϕ | 0,99 |
| B_2 | 0,77 |
| \wedge | 160 [μm] |
| ν | $1,84 \times 10^{-5}$ [Pa·s] |

sendo que a Figura 4c mostra o coeficiente de absorção da melamina, que está de acordo com os resultados encontrados em [17]. De posse de Z_s , a pressão total em cada microfone foi calculada pela Equação (15), como pode ser visto na Figura 5.

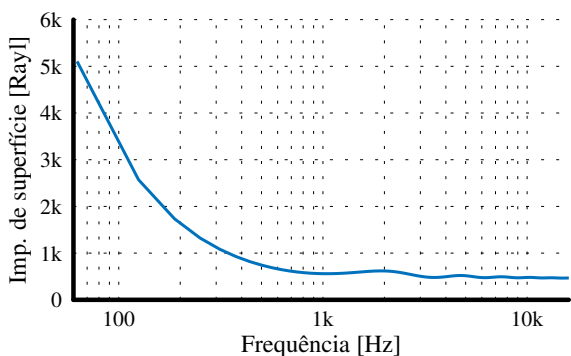
De posse do sinal dos microfones, o algoritmo SLIM foi aplicado para determinar a localização das fontes no ambiente virtual de teste. A Figura 6 compara a resolução obtida pelos algoritmos DAS e SLIM.

O gráfico da distribuição de energia pela direção de chegada do SLIM permite determinar com maior facilidade o número de fontes presentes, no caso duas, e a posição destas fontes, no caso a fonte real em 180° e a fonte-imagem em 0° . Note que na simulação a posição exata das fontes é conhecida, mas esta etapa é importante para uma medição *in situ*, em que é provável que existam desvios da posição real em relação à posição pretendida. De posse da informação da quantidade e posição das fontes sonoras que compõem o campo sonoro em questão aplica-se então o algoritmo RELAX para recuperar (com menor distorção que com o SLIM) as formas de onda provenientes de cada direção de interesse. O resultado do algoritmo RELAX é mostrado na Figura 7.

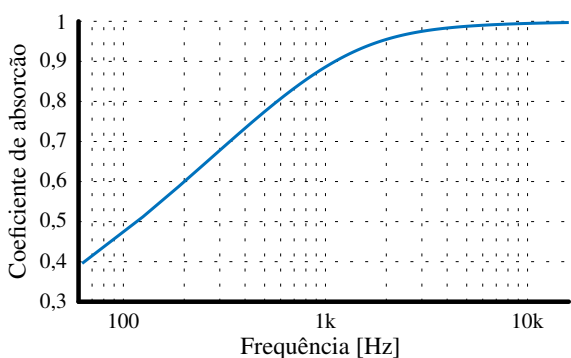
De posse das componentes incidente e refletida do campo sonoro extraídas com o WB-SLIM/RELAX, é possível calcular o valor do coeficiente de reflexão de acordo com a Equação (2). Note que o RELAX funciona como se houvesse um único microfone superdirecional na posição central do arranjo. No entanto,



(a) Impedância característica



(b) Impedância de superfície



(c) Coeficiente de absorção

Figura 4: Impedância característica (a), impedância de superfície (b) e coeficiente de absorção (c) da melamina, simulado de acordo com o modelo de [22].

o coeficiente de reflexão é definido apenas na interface ar/amostra. Portanto, é necessário deslocar as ondas do ponto central do arranjo para a superfície da amostra. Assumindo uma onda plana, esta correção é feita simplesmente atrasando ou adiantando o sinal proporcionalmente. De posse de $R(\omega)$, basta então aplicar a Equação (4) para se obter a impedância de superfície e a Equação (3) para se obter o coeficiente de absorção. Os resultados para o módulo da impedância de superfície, o coeficiente de absorção e

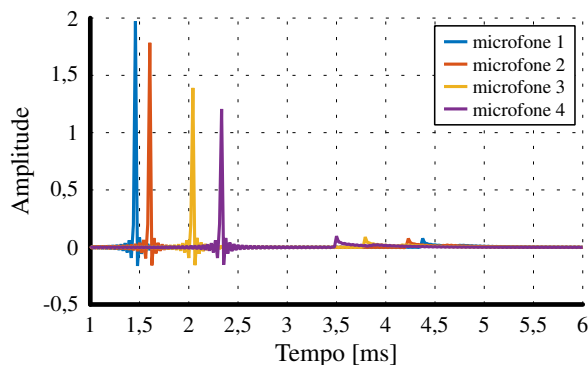


Figura 5: Resposta temporal simulada nos quatro microfones do arranjo para um impulso emitido pela fonte pontual e refletido pela amostra de melamina.

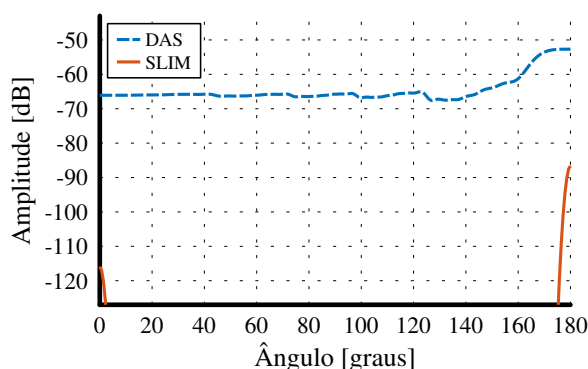


Figura 6: Comparação da resolução da localização das fontes obtidas com os algoritmos DAS e WB-SLIM.

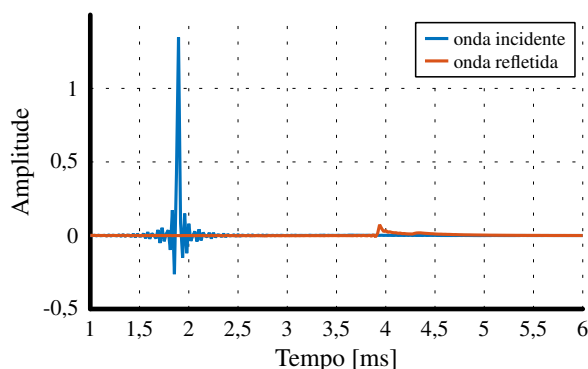
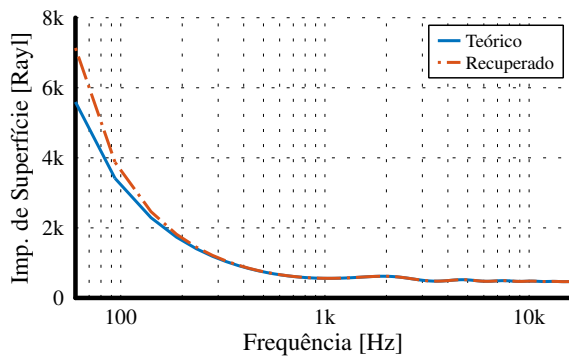


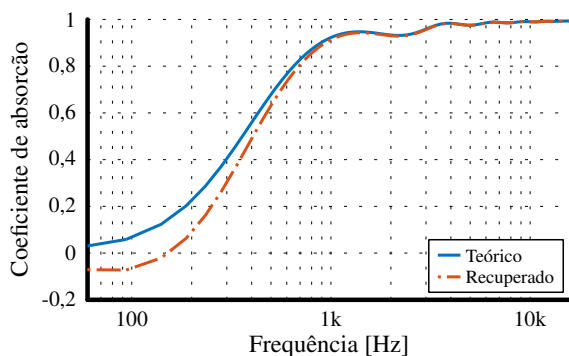
Figura 7: Componentes incidente e refletida recuperados pelo algoritmo RELAX de posse das informações de quantidade e direções de fontes fornecidas pelo algoritmo SLIM.

módulo do coeficiente de reflexão recuperados pelo método proposto em comparação com o valor teórico são mostrados na Figura 8.

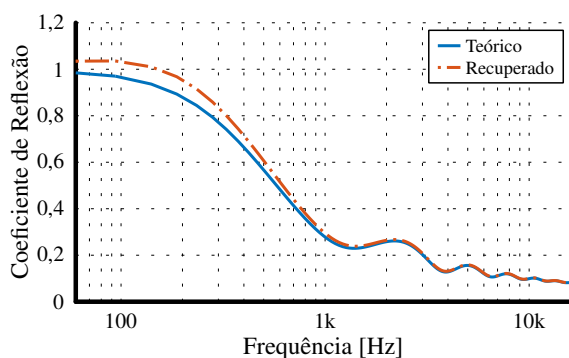
Observando a Figura 8 verifica-se que os resultados obtidos pelo método proposto começam a se distanciar dos valores teóricos para frequências



(a) Impedância de superfície



(b) Coeficiente de absorção



(c) Coeficiente de reflexão

Figura 8: Comparação dos valores do módulo da impedância de superfície, coeficiente de absorção e módulo do coeficiente de reflexão recuperados pelo algoritmo proposto em comparação com o valor teórico para uma amostra de melamina.

abaixo de aproximadamente 500 Hz. Acredita-se que a razão para esse superdimensionamento da impedância em baixas frequências ocorra pelo fato do cálculo dos coeficientes acústicos ter sido realizado assumindo uma propagação de onda plana enquanto o modelo de propagação usa, de fato, uma fonte pontual com propagação de onda esférica. Este fenômeno é muito provável de também acontecer em medições *in*

situ, uma vez que alto-falantes a distâncias próximas da amostra irão irradiar ondas esféricas, que apenas para altas frequências poderão ser razoavelmente aproximadas por ondas planas.

6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados são promissores, uma vez que o método proposto de processamento de arranjo com regularização promotora de esparsidade foi capaz de separar as componentes incidente e refletida do campo sonoro e calcular a impedância de superfície a partir dela. No entanto, o método ainda pode ser melhorado para as regiões de média e baixa frequências, substituindo-se o modelo de onda plana por um modelo de onda esférica.

Esses resultados mostram que a continuidade da pesquisa será em procurar melhorar os resultados para as baixas frequências. Para isso será necessário estudar o cálculo dos parâmetros acústicos para diferentes campos sonoros, em especial ondas esféricas.

7. AGRADECIMENTOS

BSM e ECB gostariam de agradecer ao CNPq pelo apoio financeiro através da chamada Universal, projeto número 400884/2016-0. TCM gostaria de agradecer ao FAEPEX-Unicamp pelo auxílio financeiro. JWF gostaria de agradecer à CAPES pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- VORLÄNDER, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. [S.l.]: Springer, 2007.
- ISO-10534-2. *Acoustics determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method*. 1998.
- ISO-354. *Measurement of sound absorption in a reverberation room Title*. 1985.
- BRANDÃO, E. *Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2011.

5. TIJS, E.; BREE, H. E. D.; BRANDÃO, E. Large scale *in situ* acoustic reflection measurements in a theatre. In: *Proc. of Nag/Daga*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 549–552.
6. TIJS, E.; BREE, H. E. D.; BRANDÃO, E. “*In situ* PU surface impedance measurements for quality control in an assembly line.”. *Proceedings of SAE international*, 2009.
7. BRANDÃO, E.; LENZI, A.; PAUL, S. A review of the *in situ* impedance and sound absorption measurement techniques. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 101, n. 3, p. 443–463, 2015.
8. CHAMPOUX, Y.; BERRY, A.; AMEDÍN, C. K. Acoustical characterization of absorbing porous materials through transmission measurements in a free field. v. 102, n. 4, p. 1982–1994, 1997.
9. GARAI, M. Measurement of the Sound-Absorption Coefficient *In Situ* . The Reflection Method Using Periodic Pseudo- random Sequences of Maximum Length. *Applied Acoustics*, v. 39, p. 119–139, 1993.
10. MOMMERTZ, E. Angle-dependent *in-situ* measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. *Applied Acoustics*, v. 46, n. 3, p. 251–263, 1995.
11. DUCOURNEAU, J.; PLANEAU, V.; CHATILLON, J.; NEJADE, A. Measurement of sound absorption coefficients of flat surfaces in a workshop. *Applied Acoustics*, v. 70, n. 5, p. 710–721, 2009.
12. OTTINK, M.; BRUNSKOG, J.; JEONG, C.-H.; FERNANDEZ-GRANDE, E.; TROJGAARD, P.; TIANA-ROIG, E. *In situ* measurements of the oblique incidence sound absorption coefficient for finite sized absorbers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 139, n. 1, p. 41–52, 2016.
13. RICHARD, A.; FERNANDEZ-GRANDE, E.; BRUNSKOG, J.; JEONG, C.-h. Impedance estimation of a finite absorber based on spherical array measurements. In: *Proc. 22nd International Congress on Acoustics*. [S.l.: s.n.], 2016.
14. van TREES, H. L. *Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
15. XU, L.; ZHAO, K.; LI, J.; STOICA, P. Wideband source localization using sparse learning via iterative minimization. *Signal Processing*, v. 93, n. 12, p. 3504 – 3514, 2013.
16. LI, J.; ZHENG, D.; STOICA, P. Angle and waveform estimation via relax. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, IEEE, v. 33, n. 3, p. 1077–1087, 1997.
17. BRANDÃO, E. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016.
18. NASCIMENTO, V. H.; MASIERO, B. S.; RIBEIRO, F. P. Acoustic imaging using the Kronecker array transform. In: COELHO, R. F.; NASCIMENTO, V. H.; QUEIROZ, R. L. de; ROMANO, J. M. T.; CAVALCANTE, C. C. (Ed.). *Signals and Images: Advances and Results in Speech, Estimation, Compression, Recognition, Filtering, and Processing*. [S.l.]: CRC Press, 2015. cap. 6, p. 153–178.
19. LAI, C. C.; NORDHOLM, S. E.; LEUNG, Y. H. *A Study Into the Design of Steerable Microphone Arrays*. [S.l.]: Springer, 2017.
20. TAN, X.; ROBERTS, W.; LI, J.; STOICA, P. Sparse learning via iterative minimization with application to mimo radar imaging. *IEEE Transactions on Signal Processing*, IEEE, v. 59, n. 3, p. 1088–1101, 2011.
21. STOICA, P.; SELÉN, Y. Cyclic minimizers, majorization techniques, and the expectation-maximization algorithm: a refresher. *IEEE Signal Processing Magazine*, IEEE, v. 21, n. 1, p. 112–114, 2004.
22. ALLARD, J. F.; CHAMPOUX, Y.; NICOLAS, J. Impedance Measurement At Oblique Incidence and Low Frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 86, n. 2, p. 766–770, 2014.
23. VERTATSCHITSCH, E.; HAYKIN, S. Nonredundant arrays. *Proceedings of the IEEE*, v. 74, n. 1, p. 217–217, Jan 1986. ISSN 0018-9219.

Desempenho acústico de paredes: influência do preenchimento de blocos cerâmicos com vermiculita expandida

Oliveira, M. F.¹ ; Heissler, R. F.¹ ; Ehrenbring, H. Z.¹ ; Trevisan, R.¹ ; Ott, M. J.¹ ; Christ, R.¹

¹ itt Performance, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS,

mariaon@unisin.br, rheissler@unisin.br, hzamis@unisin.br, mairajo@unisin.br, rchrist@unisin.br

Resumo

As cavidades em blocos de vedação diminuem a massa superficial do elemento e aumentam as ressonâncias internas nos blocos, prejudicando o isolamento sonoro. Para minimizar esse efeito, os septos dos blocos podem ser preenchidos com material poroso, criando um amortecimento interno das ondas sonoras. Um material com potencial para tal fim é a vermiculita expandida. Nesse sentido, o estudo buscou avaliar a influência da utilização de vermiculita expandida no preenchimento de septos de blocos cerâmicos em paredes de alvenaria para o aumento do isolamento acústico desses sistemas construtivos, por meio de ensaios de perda de transmissão sonora. Para tal, foram preparadas 12 amostras com blocos cerâmicos de geometrias distintas nas seguintes composições: sem revestimento, com revestimento de gesso e revestimento em argamassa. Além disso, para cada composição foram construídas amostras sem e com o preenchimento dos septos dos blocos com vermiculita expandida. O índice de redução sonora foi determinado seguindo os parâmetros da ISO 10140:2010, sendo os ensaios realizados em câmara reverberante de ruído aéreo do itt Performance da UNISINOS. Verificou-se que o preenchimento dos septos dos blocos com 14 cm de espessura proporcionou um aumento no seu isolamento acústico de até 13 dB.

Palavras-chave: isolamento aéreo, índice de redução sonora, ressonâncias, amortecimento.

PACS: 43.55.Rg, 43.55.Vj, 43.50.Qp.

The acoustic performance of walls: influence of ceramic blocks filling with expanded vermiculite

Abstract

Masonry block cavities decrease surface mass and increase internal resonances in blocks, impairing sound insulation. To minimize this effect, block septa can be filled with porous material, creating internal damping of sound waves. A potential material for this purpose is expanded vermiculite. This study aimed to evaluate the influence of the use of expanded vermiculite in the filling of ceramic block septa in masonry walls to increase the acoustic insulation of these building systems, through sound transmission loss tests. For such purpose, 12 samples were prepared with ceramic blocks of different geometries in the following compositions: uncoated, plastered and mortar coated. In addition, for each composition samples were constructed without and with the filling of the septa of the blocks with expanded vermiculite. In addition, for each samples were constructed without and with the filling of the septa of the blocks with expanded vermiculite. The noise reduction index was determined following the parameters of ISO 10140: 2010, being the tests performed in UNISINOS reverberant chamber. Filling the septa of the 14 cm-thick blocks provided an increase in their sound insulation by up to 13 dB.

Keywords: sound insulation, sound reduction index, resonances, damping.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos é amplamente empregada no setor da construção civil. Sabbatini [1] define alvenaria como um elemento heterogêneo, construído em blocos ou tijolos, e conectados por meio de argamassa de assentamento, formando um sistema rígido e homogêneo. Manoharan et al. [2] citaram que as alvenarias são componentes básicos na composição das edificações, comumente utilizados nas construções ao longo do tempo, variando sua composição em função da argila disponível em cada região.

A utilização de elementos vazados na construção civil tem o propósito de aumentar o isolamento térmico dos sistemas, e deixá-los mais leves, mais fáceis de manusear e podem ocasionar a diminuição das cargas nas fundações da edificação. Sendo assim, apresentam melhor custo benefício, quando comparados a blocos maciços [3]. Essas mesmas perfurações, que promovem esses benefícios, também são responsáveis pelo menor isolamento sonoro das alvenarias, pois diminuem substancialmente a massa superficial dos sistemas, bem como aumentam as ressonâncias internas nos septos dos blocos [4]. Com isso, tais elementos provocam uma considerável redução da capacidade do sistema em reduzir a transmissão sonora [5]. A estimativa das propriedades acústicas de uma parede de alvenaria composta por blocos vazados pode apresentar algumas imprecisões devido à sua característica ortotrópica e não homogênea para a transmissão sonora. Além das variações na produção dos blocos, que são decorrentes das composições de argila e processos de queima, pode-se citar inúmeras diversidades geométricas desses elementos construtivos e as inúmeras opções de revestimentos de gesso, argamassa e composições de *drywall*, podendo ainda sofrer alterações devido à sua composição, mão-de-obra e insumos empregados [6].

Diversos pesquisadores têm estudado variáveis em relação às paredes de alvenaria, visando identificar quais fatores qualificam o comportamento desses sistemas. Narang [7] estudou o

efeito de tirantes metálicos utilizados como reforço estrutural em alvenarias, verificando que esses componentes prejudicaram o sistema por transmitir a vibração. Semprini e Barbaresi [8] avaliaram o comportamento acústico de paredes de alvenaria com blocos de reduzida massa específica, afirmando ser um sistema de uso expressivo na Itália. Os autores verificaram em seu estudo a relevância no revestimento para a qualificação do desempenho acústico dessas paredes.

A eficiência do isolamento acústico de alvenarias apresenta expressiva dependência da geometria dos furos dos blocos e da espessura total do sistema, tendo como consequência a redução de massa superficial. Além disso, os vazados aumentam a ressonância interna nos blocos, com uma considerável redução na capacidade de isolamento acústico [3].

Klippel Filho et al. [9] realizaram um estudo para verificar a influência da geometria de blocos vazados no desempenho acústico de alvenarias com blocos cerâmicos. Os ensaios foram realizados em laboratório com sete diferentes tipos de blocos com espessura equivalente a 14 cm, em paredes com e sem revestimento argamassado. Nesse estudo, foram investigadas associações entre os resultados de perda de transmissão sonora e as relações entre área líquida e área bruta dos blocos (A_{liq}/A_b). Os resultados mostraram que, sem revestimento, os maiores índices de redução sonora foram obtidos nas amostras com maior massa superficial e maior relação A_{liq}/A_b . Por outro lado, com as amostras revestidas, a aplicação do revestimento aumentou o isolamento das amostras, e ainda, a massa superficial teve maior influência no desempenho em comparação à relação A_{liq}/A_b , ainda que os maiores isolamentos foram obtidos pelas amostras de maior relação A_{liq}/A_b .

Trevisan et al. [10] comparam o isolamento acústico em laboratório de paredes de alvenaria com blocos de 14 cm revestidos com argamassa e placas de gesso acartonado no sistema *drywall* e fixadas com adesivo com duas diferentes densidades (8,5 kg/m² e 12 kg/m²). Nesse estudo, além da parede de referência

com revestimento em argamassa, foram testadas outras 10 composições, que obtiveram variações de montagem: chapas de gesso coladas na alvenaria, fixadas em montantes metálicos com e sem o preenchimento com material fibroso. Os resultados evidenciaram que em amostras com placas de gesso acartonado fixadas em montantes, o uso da lã mineral aumenta o isolamento acústico em 6 dB. Também foi verificado que o uso de chapas de gesso acartonado com maior densidade eleva o isolamento acústico das alvenarias estudadas em 2 dB, quando comparadas ao mesmo sistema com pacas do tipo *standard*.

Friedrich, Paixão e Vergara [11] ao avaliarem sistemas de vedação em diferentes tipologias de revestimento, incluindo a parede sem revestimento, indicam a relevância do revestimento para contribuição no desempenho acústico final das amostras. Os autores informam ainda que para realização de ensaios acústicos não se faz necessária a cura de revestimentos argamassados pelo mesmo período requerido para ensaios físicos ou mecânicos de 28 dias. Em seu estudo, comprovou-se que os resultados de isolamento acústico estabilizam a partir do sétimo dia de secagem da amostra.

A utilização de revestimento argamassado em paredes com blocos vazados preenchidos com vermiculita foi estudada por Souza et al. [12] em ensaios de perda de transmissão sonora em laboratório. A comparação do isolamento acústico de alvenarias de blocos cerâmicos de 19 cm de espessura, com e sem revestimento evidenciou um acréscimo de 2 dB no isolamento, sendo que, a amostra sem revestimento com R_w de 46 dB, e a amostra com revestimento de argamassa na espessura de 2,5 cm em cada face, com R_w de 48 dB.

O efeito da ressonância dos elementos vazados pode ser minimizado com o preenchimento dos vazios dos blocos com materiais porosos, ou seja, onde a influência maior se dá pelo amortecimento interno.

A vermiculita expandida é um mineral da família das micas que, quando exposto a altas temperaturas pode sofrer uma expansão de até trinta vezes o seu tamanho original [13, 14]. Segundo Rashad [15], o processo de expansão da vermiculita ocorre com temperaturas entre 650–950 °C e suas propriedades prospectivas como baixa condutividade térmica, baixa densidade de massa, resistência, inércia química e ponto de fusão relativamente alto, indicam um forte potencial de aplicações na construção civil.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo investigar a influência do preenchimento dos vazios de blocos cerâmicos vazados no isolamento acústico de paredes de alvenaria com diferentes revestimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais utilizados no estudo e a metodologia de ensaio.

2.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa dividem-se entre aqueles utilizados para conformação dos sistemas verticais de vedação em alvenaria de blocos cerâmicos, os revestimentos e os materiais utilizados para preenchimento das cavidades nos blocos cerâmicos.

Os blocos cerâmicos utilizados nesta pesquisa foram de dois tipos diferentes, produzidos por meio da queima da argila, oriundos da Mesorregião Macro Metropolitana Paulista, São Paulo.

A argamassa utilizada é com base cimentícia, industrializada. Foi buscado utilizar uma argamassa para revestimento e assentamento que tivesse, no mínimo, 1800 kg/m³.

A vermiculita expandida utilizada foi fornecida pelo fabricante Brasil Minérios e possui o nome comercial de VermiFloc Acústico, sendo extraída em jazida no estado de Goiás/Brasil. O material foi obtido já como produto disponível no mercado, apresentando granulometria variável, conforme ilustra a Figura 1.



Figura 1: Vermiculita expandida.


Neste trabalho, os dois blocos foram denominados conforme definições da NBR 15270-1 [16], sendo um estrutural (E) e o outro com paredes maciças (M). De acordo com esta norma, bloco estrutural é aquele que possui vazados prismáticos, perpendiculares às faces que os contêm, produzido para ser assentado com os vazados na vertical, com características e propriedades específicas para alvenaria estrutural enquanto que o bloco com paredes maciças é denominado aquele cujas paredes externas são maciças e as internas podem ser paredes maciças ou vazadas.

2.2. Preparo das amostras

Os ensaios de perda de transmissão sonora envolveram o preparo de 12 amostras, com dois diferentes tipos de blocos cerâmicos.

Com cada tipo de bloco foram construídas paredes nas seguintes composições: sem revestimento (SR), com revestimento de gesso (RG) e revestimento em argamassa (RA). Além disso, para cada composição foram construídas amostras sem e com o preenchimento dos septos dos blocos com vermiculita expandida (V), conforme especificado no Quadro 1.

Quadro 1: Composição das amostras.

| IMAGEM E ESPECIFICAÇÕES DOS BLOCOS | CARACTERÍSTICA DA AMOSTRA | IDENTIFICAÇÃO |
|---|--|---------------|
|  Dimensões: 14x19x39 cm Fbk: 4,5 Mpa Peso: 9,3 kg | Parede sem revestimento e sem vermiculita | E SR |
| | Parede com revestimento em gesso de 0,5 cm de espessura em ambas as faces, sem vermiculita | E RG |
| | Parede com revestimento em argamassa de 2,5 cm de espessura em ambas as faces, sem vermiculita | E RA |
| | Parede sem revestimento, com vermiculita | EV SR |
| | Parede com revestimento em gesso de 0,5 cm de espessura em ambas as faces, com vermiculita | EV RG |
| | Parede com revestimento em argamassa de 2,5 cm de espessura em ambas as faces, com vermiculita | EV RA |
|  Dimensões: 14x19x29 cm Fbk: 12 Mpa Peso: 6,9 kg | Parede sem revestimento e sem vermiculita | M SR |
| | Parede com revestimento em gesso de 0,5 cm de espessura em ambas as faces, sem vermiculita | M RG |
| | Parede com revestimento em argamassa de 2,5 cm de espessura em ambas as faces, sem vermiculita | M RA |
| | Parede sem revestimento, com vermiculita | MV SR |
| | Parede com revestimento em gesso de 0,5 cm de espessura em ambas as faces, com vermiculita | MV RG |
| | Parede com revestimento em argamassa de 2,5 cm de espessura em ambas as faces, com vermiculita | MV RA |

Nos sistemas verticais com preenchimento das cavidades, adotou-se o uso de funil dosador para o preenchimento gradual dos septos a cada

fiada. A Figura 2 apresenta algumas das etapas da construção das amostras.



Figura 2: Etapas de construção das amostras: (a) preenchimento dos blocos com vermiculita, (b) construção das alvenarias fora da câmara, (c) amostra sem revestimento instalada na câmara, (d) amostra com revestimento instalada na câmara.

Para todas as amostras, após o assentamento dos blocos, realizou-se o revestimento de gesso e de argamassa cimentícia. Para o revestimento argamassado, contou-se com a realização de duas etapas: realização do chapisco, para garantir aderência do emboço e uniformidade na absorção do substrato e do emboço, e revestimento argamassado com projeção manual.

Após concluída a execução das amostras, foi obedecido o tempo mínimo de sete dias de secagem até a realização dos ensaios. As paredes foram mantidas em condições ambiente de

temperatura e umidade, sendo estes parâmetros incontroláveis, somente passíveis de verificação.

2.3. Ensaios de isolamento acústico

Os ensaios foram realizados na câmara reverberante de ruído aéreo do itt Performance da Unisinos, sendo esta dividida em duas salas, uma emissora e uma receptora, com volume de 61,3 m³ e 57,8 m³, respectivamente.

As amostras foram instaladas entre as duas câmaras através da inserção de um pórtilo no qual as amostras foram construídas (Figura 3). A Figura 4 representa as vistas lateral e frontal do pórtilo de concreto armado em que foram executadas as amostras, com cotas em metros.

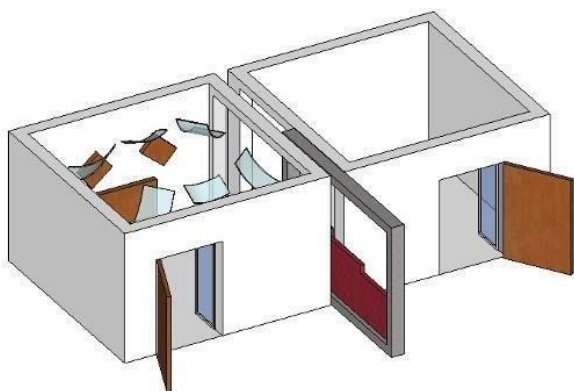


Figura 3: Câmaras de ensaio.

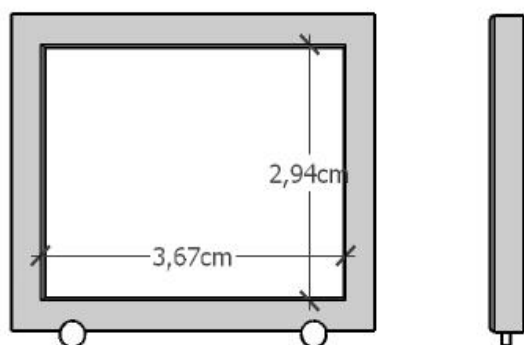


Figura 4: Pórtilo para execução das amostras.

Para a realização do ensaio de isolamento ao ruído aéreo foram seguidas as recomendações da norma ISO 10140-2:2010 [17], tanto nos procedimentos de ensaio, como nas características a serem obedecidas nas câmaras de ensaio.

Na realização do ensaio, alguns parâmetros climáticos devem ser observados: a temperatura não pode ser menor do que 15 °C e a umidade relativa do ar superior a 90 %. Sendo essas medidas observadas, são feitas as medições.

Os equipamentos utilizados foram da marca Brüel & Kjær, com o conjunto composto por: amplificador de potência modelo 2734-A, fonte onidirecional, modelo 4292-L, analisador sonoro modelo 2270, microfone modelo 4189, calibrador portátil modelo 4231 e cabos modelos AQ-0673 e AO-0523.

Com os valores do índice de redução sonora calculados para cada banda de frequência em terços de oitava, faz-se o procedimento descrito pela ISO 717-1:2013 [18], para a obtenção do valor ponderado R_w .

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios por bandas de terços de oitavas para as amostras compostas por blocos estruturais podem ser verificados na Figura 5.

Em todas as situações, o preenchimento dos septos com vermiculita aumentou o isolamento acústico das paredes e o ganho no isolamento foi entre 5 e 7 dB no valor ponderado. A amostra composta por blocos estruturais com preenchimento de vermiculita sem revestimento (EV SR) e a amostra composta por blocos estruturais com preenchimento de vermiculita e revestimento de gesso apresentaram o mesmo isolamento sonoro. Além do valor ponderado ser o mesmo, R_w igual a 44 dB, as curvas apresentam comportamento muito semelhante, sendo coincidentes entre as bandas de 630 e 1.250 Hz. Dessa forma, pode-se afirmar que o efeito do amortecimento interno desse material granulado compensa o uso de camadas muito finas de revestimentos em paredes de alvenaria, com a redução da ressonância interna nos blocos, conforme indicado em estudos de Fringuellino e Smith [3]. As amostras confeccionadas com blocos estruturais, que receberam revestimento argamassado, já apresentaram maior isolamento acústico, decorrente da adição de massa do próprio revestimento. Todavia, também foi verificado o efeito do amortecimento proporcionado pelo preenchimento dos septos dos blocos com o conseqüente aumento no desempenho acústico do sistema. Nessas amostras (E RA e EV RA) o aumento no isolamento sonoro foi evidenciado nos resultados parciais por bandas

de frequências entre 630 e 3.150 Hz, e no R_w de 45 dB sem preenchimento e 51 dB com preenchimento dos septos com a vermiculita expandida.

De acordo com Patrício [19] a utilização de amortecimento no interior da cavidade entre

duas placas também irá alterar o posicionamento da frequência fundamental do sistema. Esse efeito pode ser verificado de forma mais pronunciada em comparações entre as amostras E SR e EV SR e entre E RG e EV RG.

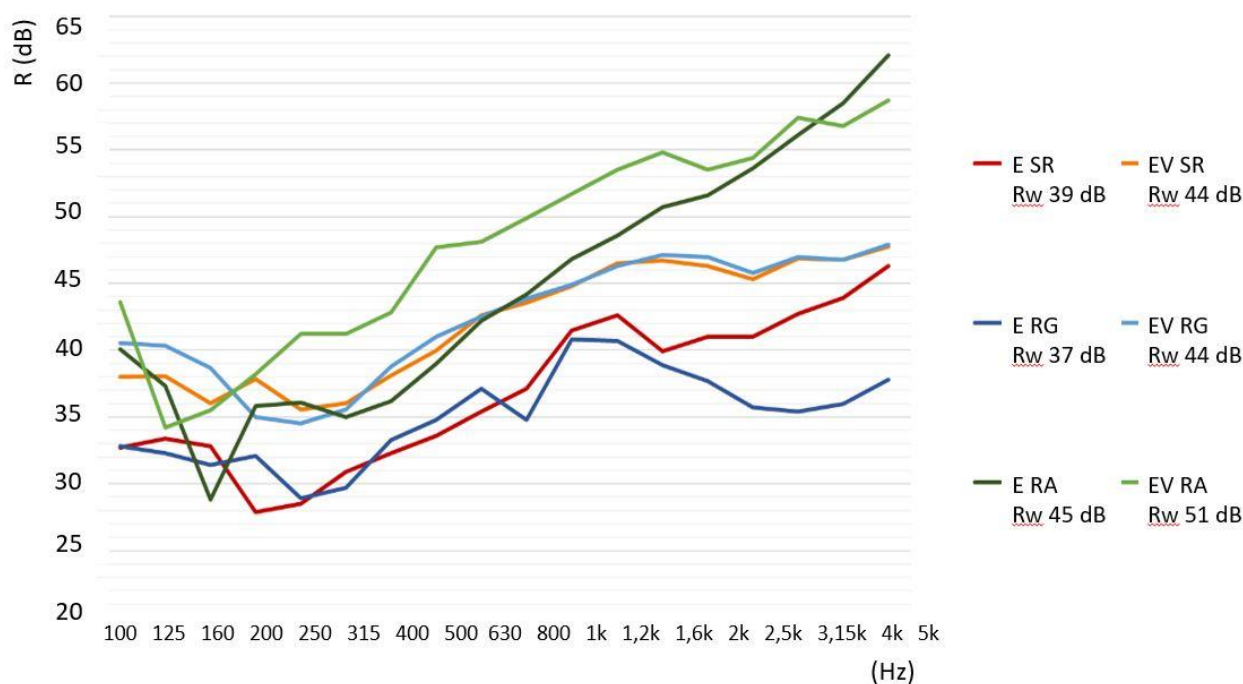


Figura 5: Resultados por bandas de terço de oitavas das amostras com bloco estruturais.

Nas amostras confeccionadas com blocos de vedação o efeito do uso da vermiculita expandida também foi verificado nas três variações de revestimento, conforme mostra a Figura 6. Assim como com as amostras compostas por blocos estruturais, os resultados das amostras com blocos de vedação preenchidos com vermiculita expandida sem revestimento (MV SR) e das amostras com revestimentos de gesso (MV RG) obtiveram o mesmo valor ponderado de 44 dB. Nessas amostras, os valores parciais por bandas de terço de oitavas ficaram semelhantes entre as bandas de 315 e 1.250 Hz. As amostras com revestimento argamassado apresentaram valores superiores em decorrência do aumento da massa e o amortecimento dado pelo preenchimento dos septos com vermiculita expandida resultou em um acréscimo de

4 dB m R_w , alcançando 50 dB com o uso do material granulado.

Na Figura 7 é apresentada uma síntese dos resultados ponderados das 12 amostras deste estudo e, pode-se perceber que o aumento no isolamento acústico foi proporcionado tanto pela adição de massa, com o uso do revestimento argamassado, quanto pela inserção de amortecimento nos vazios dos blocos cerâmicos. Comparando-se a amostra com maior fragilidade acústica, ou seja, sem revestimento e sem preenchimento das cavidades dos blocos, com a amostra confeccionada com revestimento argamassado e vermiculita expandida, o aumento no isolamento acústico foi de 12 dB nas amostras com blocos estruturais (E SR e EV RA) e de 13 dB nas amostras compostas por blocos de vedação (M SR e MV RA).

O aumento na capacidade de isolamento acústico com a adição de revestimento argamassado foi de 6 dB nas amostras confeccionadas com blocos de vedação, representando, aproximadamente, 1 dB para cada 1 cm de revestimento. Essa mesma relação foi encontrada por Klippel Filho et al. [20] em paredes compostas por blocos de vedação de 14 cm de espessura. No entanto, as diferenças encontradas nos blocos de 14 cm de espessura foram superiores às

verificadas no estudo de Souza et al. [12], que verificaram o aumento de 2 dB em R_w com a adição de 5 cm de reboco utilizando o mesmo traço de argamassa, em amostras compostas por blocos cerâmicos vazados de 19 cm de espessura com o preenchimento das cavidades com vermiculita expandida.

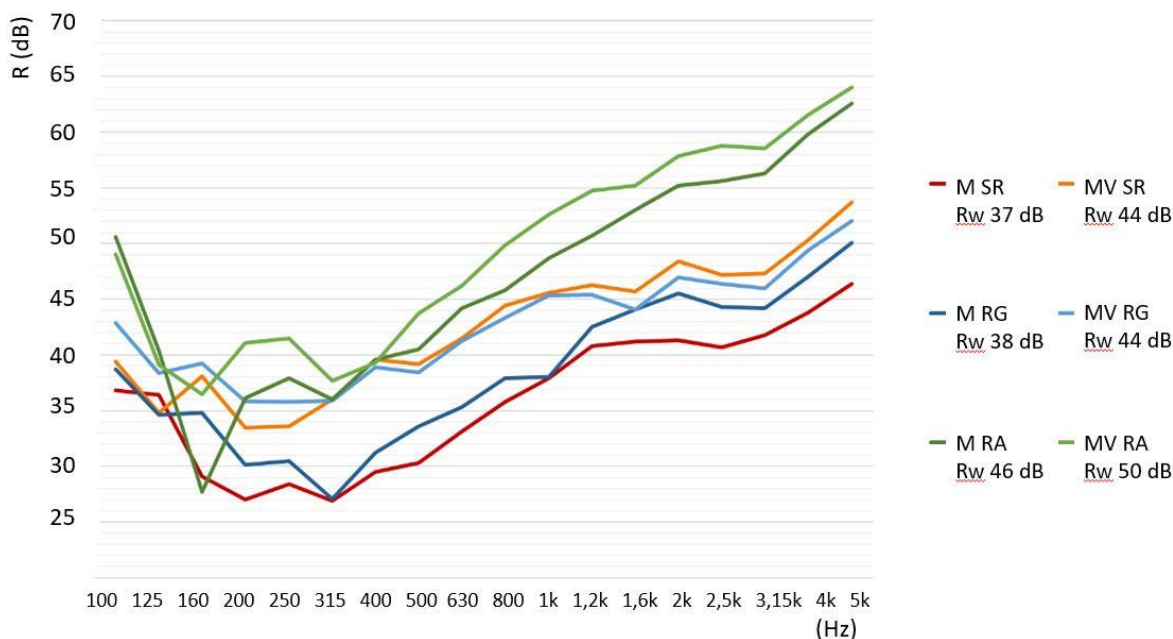


Figura 6: Resultados por bandas de terço de oitavas das amostras com blocos de vedação.

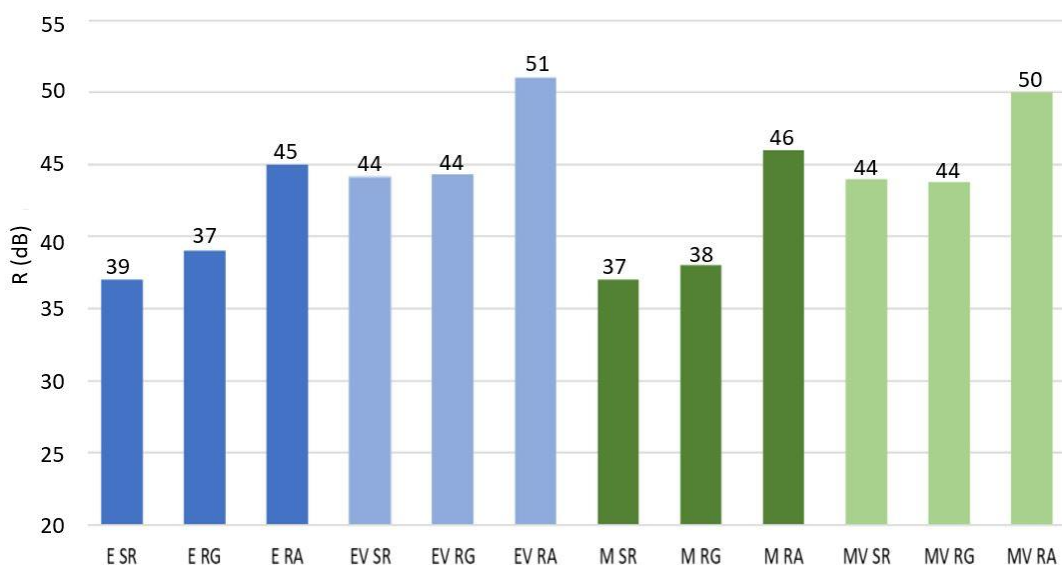


Figura 7: Resultados de R_w para as amostras do estudo.

4. CONCLUSÃO

A busca por alternativas para a qualificação do desempenho acústico dos atuais sistemas construtivos brasileiros tem relevância no sentido de aportar tecnicamente a cadeia produtiva da construção civil. Nesse sentido, este estudo avaliou a utilização de vermiculita expandida no preenchimento de blocos cerâmicos em paredes de alvenaria para o aumento do isolamento acústico desses sistemas construtivos.

Verificou-se que o uso de vermiculita expandida como material de preenchimento dos septos de blocos cerâmico de vedação de 14 cm de espessura, pode aumentar em até 13 dB o isolamento de paredes de alvenaria. Já nos

blocos cerâmico estruturais com a mesma dimensão, foi verificado um aumento de até 12 dB no isolamento ao som aéreo.

Por fim, o uso deste material de origem mineral, apresentou aumento no isolamento ao som aéreo em sistemas de vedação vertical, podendo ser uma alternativa de uso de acordo com a necessidade de desempenho.

5. AGRADECIMENTOS

Fica registrado aqui um agradecimento especial à Cerâmica City, que auxiliou no desenvolvimento desta pesquisa, bem como à empresa Brasil Minérios S/A pela autorização na divulgação das informações.

REFERÊNCIAS

1. SABBATINI, F.H. Alvenaria estrutural: Materiais, execução da estrutura e controle tecnológico. DIDUP/GEPAD. Brasília, 2003.
2. MANOHARAN, C. et al. Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. *Applied Clay Science*, v. 54, n. 1, p. 20-25, 2011. Disponível em: <doi: 10.1016/j.clay.2011.07.002>.
3. FRINGUELLINO, M.; SMITH, S. Sound transmission through hollow brick walls, *Building Acoustics*. p. 211-224, 1999. Disponível em: <doi: 10.1260/1351010991501419>.
4. HOPKINS, C. Sound insulation. Oxford: Elsevier Ltd., 2012.
5. PATRÍCIO, J. V. Acústica nos edifícios. 7 ed. Porto: Pubindústria, Edições Técnicas, 2018.
6. JACQUS, G.; BERGER, S.; GIBIAT, V.; JEAN, P.; VILLOT, M.; CIUKAJ, S. A homogenised vibratory model for predicting the acoustic properties of hollow brick walls, *Journal of Sound and Vibration*, v. 330, p. 3400-3409. 2011. Disponível em: <doi: 10.1016/j.jsv.2011.02.015>.
7. NARANG, P. P. Sound bridging by wall ties in cavity brick walls: theory and experiment. *Journal of Sound and Vibration*, v. 174, n. 2, p. 169-180, 1994.
8. SEMPRINI, G.; BARBARES, L. Acoustical properties of light brick walls and its effects on flanking transmission. *Euronoise 2008*. Anais... p. 5579-5583, 2008. Paris: EAA, 2008.
9. KLIPPEL FILHO, S.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B.; OLIVEIRA, M. F.; PATRÍCIO, J. V. A influência da geometria de blocos cerâmicos vazados no isolamento acústico de paredes. *SOBRAC 2018*. Anais... Porto Alegre: Galoá, 2018.
10. TREVISAN, R.; KLIPPEL FILHO, S.; PIRES, J. R.; OLIVEIRA, M. F. Sound insulation comparative study on ceramic masonry with mortar or plasterboard coating. *FIA 2016*. Anais... Buenos Aires: AdA, 2016.
11. FRIEDRICH, A.F.; PAIXÃO, D.X.; VERGARA, E.F. Contribuição do revestimento no isolamento acústico de paredes de alvenaria. *ENTAC 2010*. Anais... Gramado: ANTAC, 2010.
12. SOUZA, C. F.; PORTO, N. O.; EHRENBRING, H. Z.; SILVERIO, P. G.; OLIVEIRA, M. F. Análise do isolamento sonoro a sons aéreos de alvenarias com blocos vazados utilizando revestimento em argamassa. *SOBRAC 2018*. Anais... Porto Alegre: Galoá, 2018.
13. CATAI, R.E.; PENTEADO, A.P.; DALBELLO, P.F. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais (17º CBECIMat)*. Anais... Foz do Iguaçu, 2006.
14. GENCEL, O.; DIAZ, J.J.d.C.; SUTCU, M.; KOKSAL, F.; RABANAL, F.P.; BARRERA, G.M.; BROSTOW, W. Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fiber: Numerical and experimental results. *Energy and Buildings*, v70, p135- 144, 2014.
15. RASHAD, A. M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, v. 125, n. 30, p. 53-62. 2016. Disponível em: <doi: 10.1016/j.jsv.2011.02.015>.

16.ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, p. 26. 2017.

17.ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATIONS. ISO 10140: Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements-- Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Genebra, p. 13. 2010.

18.ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATIONS. ISO 717: Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements-- Part 1: Airborne sound insulation. Genebra, p. 18. 2013.

19.PATRÍCIO, J. V. Isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão: Metodologias de caracterização. LNEC: Lisboa, 2010.

20.KLIPPEL FILHO, S.; LABRES, H.; PACHECO, F.; OLIVEIRA, M. F.; TUTIKIAN, B. F. Influência da espessura de revestimentos de argamassa no desempenho acústico de alvenarias de blocos cerâmicos. Ambiente Construído. Porto Alegre.

A acústica dos espaços urbanos em microescala: geometria e acurácia em modelos virtuais

Rocha, R. E. da¹ ; Bertoli, S. R.¹

¹ Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, rafaellaestevaorocha@gmail.com, rolla@fec.unicamp.br

Resumo

Apesar da lacuna de pesquisas nacionais, a literatura internacional aponta diferentes modos de investigação acústica dos espaços urbanos em microescala. Algumas dessas abordagens baseiam-se na aplicação computacional da teoria da acústica geométrica, comumente utilizada para investigações em acústica de salas. Apesar do uso em comum, as interfaces da simulação computacional da propagação sonora nos espaços urbanos em microescala, como numa praça, podem ser diferentes das de um espaço fechado, como uma sala de concertos. Assim, tanto pela lacuna de estudos em microescala urbana que comparem medições *in situ* e simulações virtuais, quanto pela escassez de investigações acerca das diferentes posturas metodológicas na construção de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica de espaços urbanos abertos, o presente estudo objetiva identificar qual modelo virtual acústico, com a geometria detalhada ou simplificada (reduzida), melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real, verificando a sua acurácia. Para isso, foram realizadas medições acústicas *in situ* de um espaço urbano real na microescala de uma praça a partir da técnica da Resposta Impulsiva, e, simulações acústicas virtuais desse mesmo espaço a partir de *software* fundamentado em acústica geométrica. Os parâmetros investigados foram o T_{30} , EDT e SPL. Os resultados evidenciaram que, em simulações computacionais, as recomendações aplicadas às salas não são necessariamente as mesmas para espaços urbanos. Ainda que se apliquem compensações típicas nos modelos com a geometria reduzida – como o aumento do coeficiente de espalhamento – àqueles com a geometria detalhada apresentaram maior aderência e acurácia em relação aos parâmetros medidos, melhor representando a realidade acústica do espaço urbano real.

Palavras-chave: detalhes arquitetônicos, mapa acústico, métodos *ray tracing* e *image source*.

PACS: 43.50.Rq, 43.55.-n, 43.55.Ka, 43.58.-e.

Microscale urban acoustics: geometry and accuracy of virtual models

Abstract

The International literature indicates different methods for microscale acoustic investigation in urban spaces. However, it is observed a lack of these investigations in Brazil. Some methods are based on computational application of geometric acoustic theory, commonly used in room acoustics simulations. However, some interfaces used in the simulation of sound propagation for microscale urban environments are different when compared to closed spaces, such as a concert hall. The purpose of this study is to identify which virtual acoustic model, with a detailed geometry or with a simplified one, better represent a real urban acoustic space. The accuracy of the model will be also investigated. A real microscale urban space, a square, was measured using the impulse response technique, and, virtually simulated using geometric acoustic software. Acoustic parameters T_{30} , EDT and SPL were investigated. Results showed that the recommendations usually applied to closed rooms are not necessarily the same for open urban spaces. Even when it is applied typical compensations in reduced geometry models, such as the increase of scattering coefficients, the model with a more detailed geometry showed better accuracy and adherence to measured results, thus better representing the reality of the actual urban space.

Keywords: architectural details, noise mapping, methods, ray tracing, image source.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primeiros avanços da onda sonora na propagação em espaços abertos, diversas são as variáveis atuantes no trajeto entre a fonte e o receptor. De maneira geral, essa interferência ocorre principalmente a partir das relações com a fonte sonora (tipo, potência, direcionalidade e distância ao receptor); das relações com os efeitos do solo (tipo de superfície e sua capacidade de reflexão ou absorção, e, interferência na direcionalidade da fonte sonora); das relações com as condições atmosféricas existentes (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento); e, por meio das relações com a forma urbana (formato das edificações, sua altura, formato de perfil de rua, em cânion ou em “L”, e a permeabilidade das quadras à onda sonora).

Diante da diversidade de variáveis influenciadoras, quando a propagação sonora tem o espaço urbano enquanto trajeto, suas investigações são frequentemente concentradas em duas escalas espaciais: a macroescala e a microescala [1–3]. A macroescala abrange grandes dimensões urbanas, como um bairro inteiro ou uma cidade. Por sua abrangência geográfica está comumente associada à execução de mapas acústicos calculados, que se baseiam em simplificações algorítmicas e aproximações do fenômeno físico de propagação sonora em espaços abertos [4,5].

Uma das aproximações refere-se à redução da geometria das edificações e a supressão de detalhes da forma das edificações. Esses detalhes *não* se referem às fachadas com superfícies irregulares, como as de edificações antigas com adornos de estuque (Figura 1A). Fachadas com superfícies irregulares são típicas em sítios históricos e antigos centros urbanos das cidades europeias. Por esse motivo a relação dessas fachadas com os fenômenos de reflexão e espalhamento é

bastante investigada¹. Por recomendação da União Europeia [12] grande parte das normas que regulamentam os cálculos dos mapas acústicos adotam diferentes coeficientes de absorção e espalhamento para caracterizar as reflexões que incidem sobre os materiais compositivos das edificações. Esta correção abrange a variação entre superfícies extremamente lisas, como vidro, e superfícies com irregularidades, como os adornos históricos.

Entretanto, fora da área de abrangência dos antigos centros urbanos tanto as superfícies das fachadas tendem a se tornar ausentes de adornos históricos, quanto as características dos detalhes arquitetônicos da forma das edificações incorporaram outros elementos arquitetônicos, como varandas, estrutura de pilares e vigas, sacadas, jardineiras, septos verticais, septos horizontais, beirais, *brise-soleils*, volumes reentrantes, volumes salientes entre outros que vão além da ornamentação da superfície (Figura 1B).



Figura 1: Superfície ornamentada de uma fachada em A; detalhes arquitetônicos da forma das edificações. Fonte: <https://pxhere.com/en/photo/1207668> para A; os autores para B.

No mapeamento acústico esses detalhes e elementos da forma arquitetônica são suprimidos. As edificações passam a ser caracterizadas enquanto blocos monolíticos ou

¹Para uma leitura precursora destes estudos recomenda-se Lyon (1974)[6] e Davies (1978)[7]; Recomenda-se ainda [8–11].

prismas puros, sem os detalhes geométricos de sua forma arquitetônica, e, portanto, muitas vezes distante de uma reprodução mais realística do espaço urbano [13].

Hoje, as aproximações na produção dos mapas acústicos admite uma margem de erro da ordem de 5 dB [12]. Valor considerado alto para ser admitido como máximo de incerteza, uma vez que a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros (*just noticeable difference* – JND) do nível pressão sonora é de 1 dB [12,14,15]. Ainda assim, o mapeamento acústico é um instrumento bastante eficiente na caracterização sonora de grandes espaços urbanos. Ao ser aplicado à correta dimensão urbana pode se constituir em uma referência para gestão e planejamento contribuindo para a prevenção, controle e monitoramento do ruído urbano [16–18].

Por outro lado, para investigações de espaços urbanos em microescala, essas simplificações algorítmicas e aproximações do mapa acústico calculado podem não ser suficientes: análises em acústica urbana que necessitam de maior precisão não devem ser conduzidas através da delimitação e métodos da macroescala, e sim da microescala. A microescala abrange dimensões urbanas de pequenas proporções, tais como ruas, esplanadas, praças, jardins, pátios entre outros.

A decisão e seleção entre macroescala e microescala urbana de investigação e seus respectivos métodos e ferramentas depende do objetivo e objeto que se anseia pesquisar [17]. Assim sendo, quando se deseja pesquisar a acústica urbana em microescala existem processos metodológicos específicos e mais adequados [17,19]. A literatura internacional aponta diferentes modos de investigação acústica desses espaços urbanos em microescala. Todos possuem em comum um alto grau de precisão e menor possibilidade de erro de maneira geral. Algumas dessas abordagens são fundamentadas e comumente executadas através de simulações acústicas de

modelos virtuais do espaço urbano em microescala.

Essas pesquisas utilizam abordagens baseadas em métodos de cálculo como o fonte-imagem (*image source*) e o traçado de raios (*ray tracing*), comumente utilizados para investigações em acústica de salas. Ambos os métodos são fundamentados na aplicação computacional da teoria da acústica geométrica que, muito simplificada, apropriam-se do princípio de que a onda sonora se propaga através do caminho mais curto² entre a fonte e o receptor em uma linha reta, ou um “raio”, sendo suas reflexões consideradas especulares ou difusas [20,21]. Esses métodos podem ser utilizados individualmente ou em processos combinados de cálculo, onde uma parte da simulação acústica é assumida pelo método fonte-imagem e a outra pelo traçado de raios e são chamados de métodos híbridos [22].

Processos metodológicos comparativos (*Round Robin*) já demonstraram a evolução da confiabilidade nos resultados obtidos de modelos híbridos em espaços fechados [23–25]. Entretanto, poucos são os estudos gerados por modelos virtuais de acústica geométrica quando comparados com medições *in situ* em espaços urbanos abertos³. Essa escassez de pesquisas comparativas não é trivial, visto que algumas das interfaces acústicas de propagação sonora nos espaços urbanos em microescala, como numa praça, podem ser ligeiramente diferentes das interfaces de propagação em um espaço

² Isso para aplicações computacionais dos métodos de cálculo de acústica geométrica que consideram a velocidade do som uniforme. Do contrário, a onda sonora é propagada considerando o caminho de menor tempo.

³ Para uma leitura mais aprofundada, recomenda-se a revisão narrativa desses estudos que envolvem simulação de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica aplicadas ao espaço urbano em microescala apresentadas por [26] e as diferentes etapas da execução da presente pesquisa apresentadas em [13,27,28].

fechado, como uma sala de concertos. As relações entre o campo livre (*free field*) e o campo reverberante (*reverberant field*), por exemplo, podem gerar diferentes comportamentos acústicos em espaços abertos e fechados. Outra diferença está nas orientações para uso desses métodos através de *software* em relação à geometria das edificações. Em acústica de salas recomenda-se a redução da geometria, simplificando-a [22]. Mas pesquisas demonstram que essa recomendação nem sempre se aplica a modelos virtuais de espaços urbanos [13,27–32]. Isso ocorre devido à expressiva presença de absorção atmosférica representada pelas superfícies nos modelos que caracterizam o céu aberto. O que torna as reflexões derivadas dos detalhes arquitetônicos essenciais para o adequado registro da energia sonora.

Um dos possíveis indicativos para a permanência dessa lacuna e para o número baixo de investigações comparativas reside na dificuldade de executar medições acústicas em pesquisas de campo sem a interferência significativa do ruído de fundo existente em um típico espaço urbano, caracterizado por múltiplas variáveis e de difícil controle. Isto faz com que diversas pesquisas em microescala urbana recorram a métodos associados a cenários urbanos hipotéticos e às simulações virtuais.

Isto posto, a busca por mais conhecimento das relações acústicas dos espaços urbanos em microescala deve ser aprofundada. Por mais que os mapas acústicos caracterizem de modo eficiente grandes dimensões, a vivência urbana do usuário é na microescala. É na utilização da escala da rua, do pátio, da praça e do jardim que o cidadão está diretamente exposto à energia sonora produzida nesse mesmo espaço urbano. E assim sendo, nessa escala, toda caracterização acústica que melhor represente a realidade do espaço urbano pode contribuir para novos modos de planejamento urbano em escalas de fato vivenciáveis.

Tanto por essa lacuna de estudos em microescala urbana que comparem medições

in situ e simulações virtuais, quanto pela escassez de investigações acerca das diferentes posturas metodológicas na construção de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica de espaços urbanos abertos, o presente estudo objetiva identificar qual modelo virtual acústico, com a geometria detalhada ou simplificada (reduzida), melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real, verificando a sua acurácia.

2. MÉTODO

Para atingir o objetivo do presente estudo a base do processo metodológico percorrido foi a pesquisa de campo e simulações acústicas virtuais. A pesquisa de campo foi realizada a partir de medições *in situ* de um espaço urbano real na escala de uma praça. Esse mesmo espaço foi modelado virtualmente a partir de *software* fundamentado em acústica geométrica, o Odeon v13 *Room Acoustic*. A seguir o espaço urbano selecionado para investigação (Seção 2.1), as medições *in situ* (Seção 2.2) e a construção dos modelos e simulações virtuais são melhor detalhadas.

2.1. O espaço urbano

A primeira definição fundamental dessa investigação foi a determinação do espaço urbano real a ser investigado. O local teve que necessariamente atender ao requisito da presença mínima de ruído de fundo para não comprometer os resultados das medições. Mesmo os mais calmos espaços urbanos são problemáticos em termos de medições que necessitem da ausência de ruídos urbanos típicos. Tais como vozes, buzinas, alarmes, sirenes, motores, frenagens, compressores entre outros.

Nesse sentido, alguns locais existentes em campi universitários proporcionam uma boa relação entre espaços urbanos e ausência de ruído de fundo. Comumente esses campi possuem grandes dimensões geográficas, abrangendo bairros inteiros, e contêm alguns espaços desocupados durante os finais de

semana, sem atividades educacionais ou de lazer, permitindo medições sem interferência significativa de ruído de fundo.

O estacionamento da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo-FEC da Universidade Estadual de Campinas-Unicamp é um desses espaços. A caracterização de sua implantação se aproxima da configuração de espaços urbanos abertos tradicionais, como um jardim urbano, uma praça ou uma esplanada, e por isso será mencionado simplesmente como “praça”.

As edificações que constituem a praça da FEC apresentam grande riqueza de detalhes arquitetônicos – com reentrâncias e saliências derivadas da presença de pilares, vigas e *brise-soleils* aparentes – constituindo-se em uma boa referência para a execução do modelo virtual detalhado (Figura 2).



Figura 2: Características morfológicas e de implantação da praça da FEC. Fonte: os autores.

A implantação dessas edificações configura um formato predominante em “L” (edificações mais altas) e em “U” (edificações mais altas associadas às mais baixas) possibilitando uma boa quantidade das reflexões necessárias para obtenção dos parâmetros investigados (Figura 2).

Tanto por tais características morfológicas, quanto pela possibilidade de ausência de ruídos aos finais de semana, a praça da FEC configura-se como um excelente espaço urbano para as medições acústicas necessárias a esta pesquisa. Assim sendo, essa praça foi selecionada para representar o espaço urbano real nessa investigação. Outras de suas características e materiais predominantes são sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização da praça da FEC.

| |
|---|
| Materiais predominantes |
| Edificações em blocos de concreto pintado, janelas em vidro comum, portas metálicas; pavimentação em bloco intertravado de concreto, solo natural com cobertura de grama. |
| Dimensões predominantes |
| Praça com dimensões aproximadas de 40x48 m; edificações com altura variável de 5,75 m a 18 m. |

Fonte: os autores.

2.2. As medições *in situ*

Após a definição do espaço urbano a ser investigado, foram realizadas as medições *in situ*. Foi utilizada a técnica de resposta impulsiva (RI) obtida a partir do *software* Dirac Room Acoustics. O sinal utilizado foi um *sweep* exponencial de 10,9 s. Os parâmetros⁴ obtidos a partir do Dirac foram o tempo de reverberação (T_{30}) e o tempo de decaimento inicial (*early decay time* - EDT) para as frequências em banda de oitava de 125 Hz a 4000 Hz. Todas as medições ficaram acima dos recomendados 40 dB para a relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* -SNR). O parâmetro nível de pressão sonora (*sound*

⁴ A escolha dos parâmetros foi derivada dos achados da revisão narrativa apresentada em [26]: em pesquisas de microescala urbana que comparam medições *in situ* e simulações virtuais predomina a investigação de SPL, EDT e T_{30} .

pressure level - SPL) e o ruído de fundo foram captados com o sonômetro tipo 2270 da Brüel & Kjær, sendo o SPL obtido através de ruído rosa. As compensações em relação ao ruído de fundo não foram necessárias para as frequências investigadas. As medições foram realizadas em um dia ensolarado de outono, apresentando 61,5% de umidade relativa e 28,3 °C de temperatura, valores devidamente inseridos nos modelos virtuais.

A posição da fonte sonora e dos pontos receptores foi determinada para obter melhor proveito de interação entre a propagação sonora e as edificações existentes na praça, e assim permitir uma boa comparação dos resultados acústicos entre a presença ou ausência dos detalhes arquitetônicos. Desse modo, foi utilizada uma fonte sonora omnidirecional a 1,6 m do piso, no vértice do conjunto de edificações mais altas, a 1,6 m do piso, em um patamar mais próximo das edificações distanciando-se 2,1 m do plano de superfícies dos pontos receptores (Figura 3).

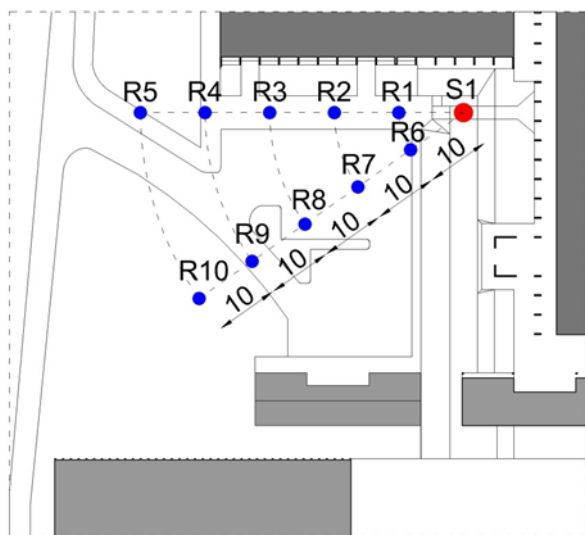


Figura 3: Posicionamento da fonte sonora S1, em vermelho, e dos pontos receptores R1 a R10, em azul. Fonte: os autores.

Microfones de medição omnidirecionais foram utilizados em 10 posições a 1,5 m do piso. Os cinco primeiros receptores (R1-R5) foram alocados a cada 10 m da fonte em uma linha paralela à edificação mais alta da praça.

Os cinco pontos restantes (R6-R10) foram alocados com os mesmos raios de distância, em relação à fonte, dos primeiros pontos, mas dessa vez distribuídos com uma maior distância das edificações, projetando-se para o campo aberto como ilustrado na Figura 3.

2.3. Os modelos virtuais e as simulações

Os modelos virtuais do espaço urbano investigado foram construídos e calculados a partir de método híbrido – que associa o método traçado de raios (*ray tracing*) ao método fonte-imagem (*image source*) – no *software* Odeon v13 Room Acoustic. Comumente utilizado para a elaboração de modelos virtuais de salas, como teatros e salas de concerto. A Figura 4 apresenta a visualização da interface do modelo virtual no Odeon.

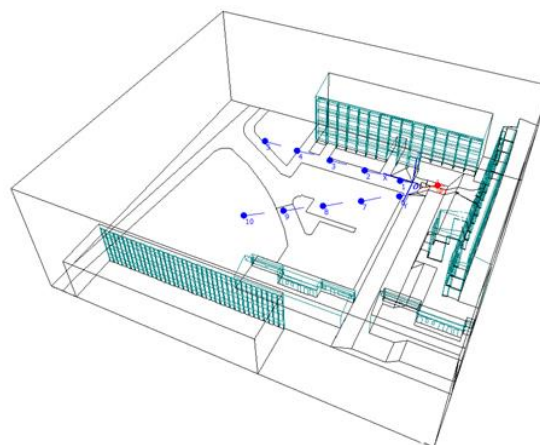


Figura 4: Imagem de interface do modelo virtual construído no *software* Odeon. Fonte: os autores.

Uma das recomendações do *software* é a redução da geometria dos modelos [22]. Contudo, devido aos poucos estudos comparativos entre métodos de cálculo híbridos aplicados a espaços urbanos em microescala associados à medições *in situ* [13,27,28,31,33] foram construídos dois modelos base, um com a geometria detalhada e outro com a geometria reduzida ou simplificada. O primeiro considerou todos os detalhes arquitetônicos conforme os encontrados nas edificações do local investigado: reentrâncias e saliências

derivadas da presença de pilares, vigas e *brise-soleils* aparentes. A Figura 5A apresenta uma imagem do modelo virtual detalhado. O segundo modelo seguiu a recomendação usual para acústica de salas, com a simplificação da sua geometria e sua respectiva compensação com o aumento do coeficiente de espalhamento (*scattering coefficient* - *s*) das superfícies geometricamente reduzidas (Figura 5B).

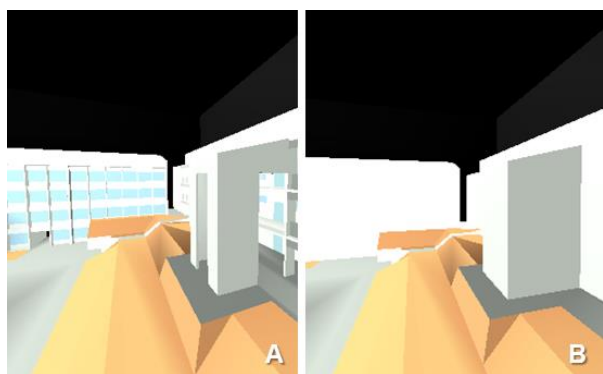


Figura 5: Em A, uma redenrização do modelo virtual detalhado construído no *software* Odeon; em B, o modelo simplificado. Fonte: os autores.

Devido a essas diferenças de geometria, foram necessárias configurações de cálculo (*setup*) também diferentes para alcançar a melhor aderência na calibração entre o modelo virtual e os resultados das medições *in situ*. A opção metodológica de diferentes *setups* não se constitui em uma variável independente, ou, em uma variável que comprometa a verificação dos resultados e da acurácia, visto que os parâmetros de referência são os dados medidos no espaço urbano real. Assim, para o ajuste do *setup* tanto faz se a geometria é simplificada ou detalhada, para ambos os modelos o objetivo é atingir valores os mais próximos possíveis da realidade acústica encontrada no local investigado.

Cada modelo foi calibrado a partir da inserção no *software* dos *audiofiles* das RI obtidas nas medições, possibilitando encontrar qual configuração de cálculo melhor se adequa aos resultados medidos através da ferramenta *Investigations of Simulations Parameters-*

ISP. Assim, foram investigados o número ótimo de raios iniciais e tardios (*early and late rays*), e o número ótimo da ordem de transição (*transition order* - TO) entre os métodos fonte-imagem e traçado de raios para cada modelo virtual para os parâmetros EDT, T_{30} e SPL. As variações de *setup* de cada um dos modelos virtuais estão detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2: Configurações dos modelos virtuais.

| Modelo | Ordem de transição (TO) e raios | Coefficientes de absorção |
|---|--|---|
| Modelo A Detalhado | Derivados da ISP (TO 3; 200000 <i>late rays</i> ; 100 <i>early rays</i>). | Livraria do Odeon de acordo existentes <i>in loco</i> . |
| Modelo B Detalhado com α otimizado | Iguais ao modelo anterior. | Modelo anterior otimizados por algoritmos genéticos. |
| Modelo C Simplificado | Iguais ao modelo anterior. | Iguais ao modelo anterior. |
| Modelo D Simplificado com novos TO e raios | Derivados da ISP (TO 0; 100000 <i>late rays</i> ; 0 <i>early rays</i>). | Iguais do modelo anterior. |
| Modelo E Simplificado com $s=1$ | Iguais ao modelo anterior. | Iguais ao modelo anterior. |
| Modelo F Simplificado com $s=0,7$ | Iguais do modelo anterior. | Iguais ao modelo anterior. |
| Modelo G Simplificado com α otimizado | Iguais ao modelo anterior. | Modelo anterior otimizados por algoritmos genéticos. |

Fonte: os autores.

As configurações de posições de fonte e receptor e a potência da fonte sonora por frequência foram as mesmas para todos os modelos. Também em todos os modelos, as superfícies que representam céu aberto

receberam absorção de 100%, estratégia típica de estudos de microescala urbana baseadas em acústica geométrica. Todos os cálculos foram realizados pelo método de precisão (*precision*)⁵.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Seções 3.1 e 3.2 são discutidos os modelos que melhor representam a realidade acústica de um espaço urbano real, com a geometria detalhada ou simplificada (reduzida), sendo discutida também a acurácia desses modelos.

3.1. Reduzir ou detalhar a geometria?

A comparação entre os modelos e os resultados das medições foi feita a partir das médias de todos os pontos receptores por frequência para cada parâmetro analisado, conforme apresentado na Figura 6. De modo geral, a tendência predominante de comportamento das curvas entre todos os modelos e a medição para os parâmetros T_{30} e SPL foram as mesmas. Pequenas variações de tendência foram encontradas no modelo simplificado para T_{30} , nos resultados medidos de SPL nas frequências 1000 Hz e 2000 Hz e nas baixas frequências para EDT. Mas no caso de EDT, a variação de tendência causada pela frequência de 125 Hz pode estar vinculada às limitações da fonte sonora em excitar as baixas frequências.

Entre os modelos de geometria reduzida, o modelo C (simplificado) foi o que apresentou o pior desempenho em todos os parâmetros, chegando a variações de 2 dB no SPL, quase 0,8 s em T_{30} e EDT. Já os modelos E (simplificado $s=1$) e F (simplificado $s=0,7$) apresentaram os melhores desempenhos em T_{30} e EDT, mas ainda sem uma boa aderência com as medições. Nesse sentido, não houve diferenças relevantes nos resultados obtidos

dos parâmetros analisados entre a modificação gradual dos coeficientes de espalhamento como pode ser visto na Figura 6. Já para o SPL esses mesmos modelos apresentaram os melhores desempenhos entre todos os modelos para as frequências de 125 Hz a 1000 Hz.

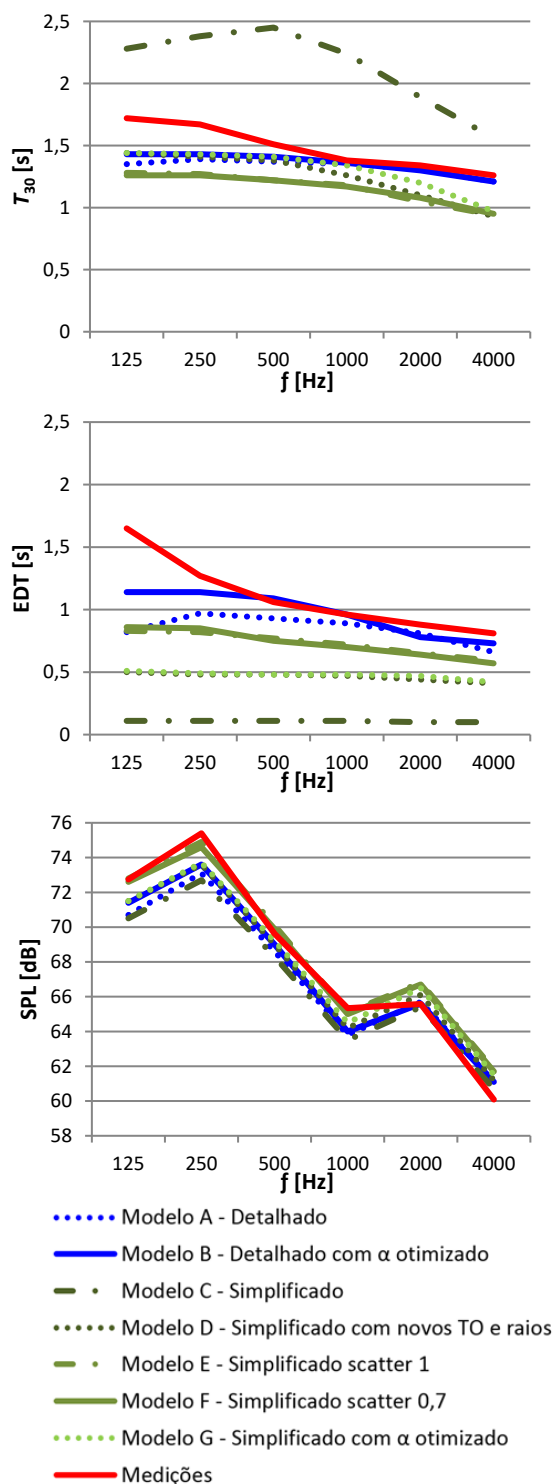


Figura 6: Médias dos resultados de T_{30} , EDT e SPL em função da frequência. Fonte: os autores.

⁵ Alinhando-se com as normas internacionais, é comum existir três opções de cálculos em *software* de acústica geométrica: o método *survey*; o *engineering* e o *precision*.

Entre os modelos com geometria detalhada os melhores resultados foram obtidos pelo modelo B (detalhado com α otimizado). Esse também foi o modelo, dentre todos os modelos investigados que obteve a maior proximidade com os resultados medidos *in situ*. A exceção está nas frequências de 125 Hz a 1000 Hz, cujo desempenho do modelo F (simplificado $s=0,7$) continuou em boa aderência com as medições.

O modelo B (detalhado com α otimizado) passou por um processo de aperfeiçoamento dos coeficientes de absorção de seus materiais. Esse processo de otimização proporcionado pelo Odeon v13 baseia-se na aplicação de algoritmos genéticos, que simplificada, representa o aprimoramento de indivíduos através de técnicas de biologia molecular como recombinação (crossover) e mutação [22]. Essas técnicas são aplicadas nos coeficientes de absorção de materiais específicos para o modelo em todas as frequências. O objetivo é fazer com que os resultados obtidos para os parâmetros analisados a partir de novos cálculos – após o α otimizado, ou seja, modificado – coincida com os resultados desses mesmos parâmetros obtidos nas medições, e assim, melhor representar no modelo a situação real⁶.

A limitação dessa aplicação está na possibilidade de se distanciar dos α dos materiais determinados originalmente e acabar incorporando coeficientes que fogem da realidade de valores para cada material, apenas para induzir a coincidência dos valores calculados com os valores medidos. Essa limitação fica perceptível quando se analisa as cores dos modelos virtuais. O Odeon estabelece as cores dos materiais de acordo com suas propriedades acústicas. Quanto mais absorvente em altas frequências, mais quentes são as tonalidades de cores apresentadas pelo modelo, como tons vermelhos e terrosos. Quanto mais absorvente em baixas frequências, mais frias serão as cores, como tons azuis e verdes. Quanto mais escura é a cor, maior é o seu coeficiente de absorção. Por exemplo, a cor preta significa que o material é 100% absorvente, como as superfícies que representam céu aberto no modelo. A Figura 7 apresenta um comparativo dessa relação em quatro modelos, o modelo A (detalhado); o modelo B (detalhado com α otimizado), o modelo C (simplificado) e o modelo G (simplificado com α otimizado).

⁶ Diferentes ferramentas que facilitam o processo de modelagem e de verificação de aderência às medições são incluídas nos diversos *software* de acústica geométrica, tais como Odeon S/A, EASE/AFMG, CATT-Acoustic, entre outros. Tais ferramentas visam dinamizar o processo, diminuindo horas trabalhadas, aumentando a assertividade e possibilitando vantagens de uso específicas a cada *software*. A aplicação de algoritmos genéticos oferecidos pelo ODEON, por exemplo, diminui a margem de erro no uso de coeficientes de absorção não aderentes. Como no caso desta pesquisa, o alfa da grama. (Segue ao lado).

Na literatura o alfa de coberturas vegetais no solo é bastante variado por banda de frequência. Depende de sua composição, da variedade da cobertura vegetal, umidade, entre outros aspectos. Na ausência da ferramenta, o processo seria executado de modo mais “analógico” e menos automatizado: diversos coeficientes de absorção disponíveis na literatura seriam testados. Para cada um deles um novo cálculo seria realizado para ser testada a aderência. Em outras palavras, o uso da ferramenta não interfere na reprodutibilidade do processo metodológico, apenas otimiza-o.

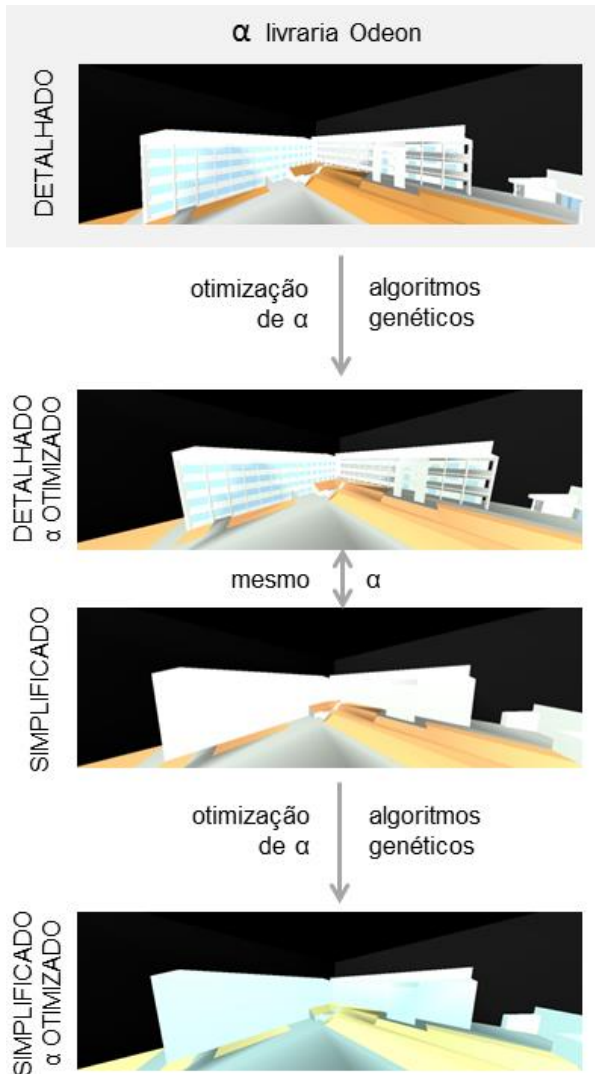


Figura 7: Distorção evidenciada pela cor azul-esverdeada dos coeficientes de absorção dos materiais dos modelos virtuais antes e após a otimização com algoritmos genéticos. Fonte: os autores.

Nos modelos otimizados foi utilizado 85% de abrangência de busca para o aperfeiçoamento para os materiais bloco de concreto, piso intertravado e grama. Entre a otimização dos modelos detalhados não houve distorções na predominância geral de absorção. Mas no caso dos modelos simplificados a distorção foi bastante grande, descaracterizando demasiadamente os coeficientes de absorção dos materiais determinados originalmente, como pode-se observar no tom azul esverdeado do modelo virtual G (simplificado com α otimizado) na Figura 7.

Nos resultados de SPL houve uma pequena diferença entre os modelos simulados e a medição acústica, que podem ser melhor compreendidos através de suas Curvas Tempo-Energia (*energy time curve- ETC*) para a posição de receptor R1 e através da visualização do comportamento da propagação de suas frentes de onda em função do tempo. A ETC do modelo B (detalhado com α otimizado) mostra a energia contida nas primeiras reflexões subdimensionadas em relação à energia obtida na ETC das medições (Figura 8-A).

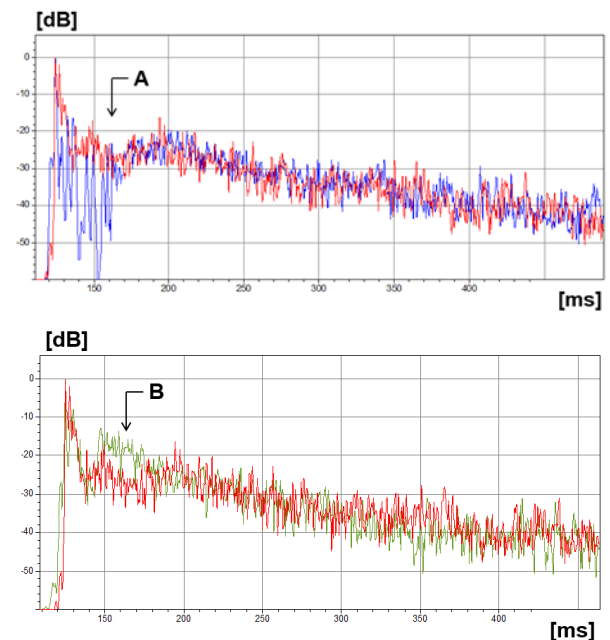


Figura 8: Sobreposição das ETC do ponto receptor R1. Em vermelho a curva medida *in situ*; em azul a curva do modelo B (detalhado com α otimizado); em verde a curva do modelo F (simplificado com $s = 0,7$). Fonte: os autores.

Mas o período de duração dessa redução coincide com a distância percorrida até a última reflexão causada pelo final da edificação, indicando que as distorções podem ser causadas pela presença dos detalhes geométricos. Esse comportamento é evidenciado pela análise da propagação da frente de onda, que mostra a rapidez com que as reflexões propiciadas pelos detalhes existentes atingem a 5ª e 6ª ordem de reflexão (em azul e magenta) (Figura 9).

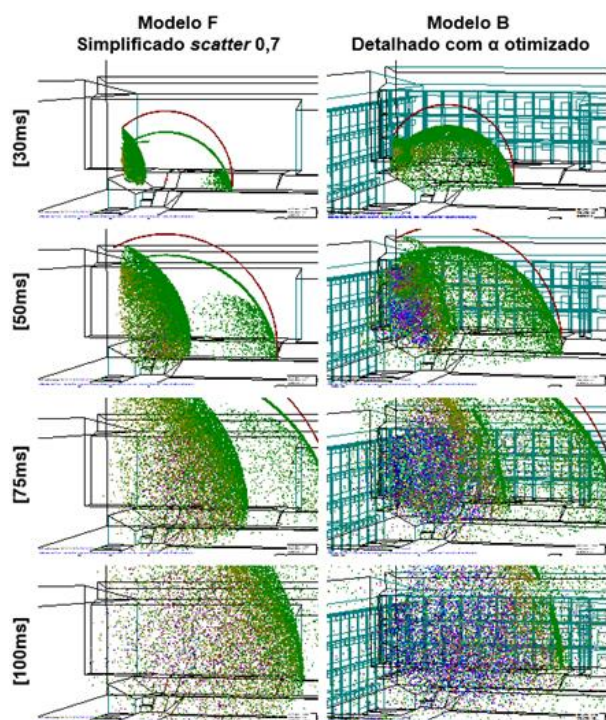


Figura 9: Representação do comportamento da frente de onda em função do tempo. Fonte: os autores.

Assim, uma vez que o material desses detalhes possui alguma absorção, a cada nova reflexão menos energia é lançada para o modelo, justificando a diferença de desempenho nas médias dos valores de SPL em relação aos valores medidos. Ainda assim, nas altas frequências o modelo B (detalhado com α otimizado) continuou sendo o modelo com maior aderência em relação às medições.

Por sua vez, o bom desempenho do modelo F (simplificado com $s=0,7$) em relação ao medido deve-se ao aumento do espalhamento das superfícies das edificações, o que também causou distorções na ETC, mas dessa vez superdimensionado parte da energia inicial, também justificado na predominância das reflexões de 1ª, 2ª e 3ª ordem da propagação da frente de onda, levando a uma boa aderência entre os resultados médios de SPL simulados e medidos nas baixas e médias frequências (Figura 8-B).

Diante de um desempenho próximo dos valores absolutos obtidos tanto por um dos modelos com geometria reduzida quanto por

um com geometria detalhada, foi importante aprofundar a análise de dados além da investigação das médias de todos os pontos receptores por frequência para cada parâmetro. Assim sendo, o modelo B (detalhado com α otimizado) e o modelo F (simplificado com $s=0,7$) foram analisados estatisticamente com o T-Test⁷ para verificar se os valores obtidos para cada parâmetro nas simulações em cada ponto receptor pertencem ou não à mesma população de indivíduos dos resultados das medições, ou seja, para verificar se há ou não há diferenças significativas entre os resultados obtidos entre os modelos virtuais e as medições. O nível de significância estabelecido foi de 95% ($p=0,05$) e a frequência selecionada foi a de 1000 Hz.

Apesar de sua proximidade com as medições na avaliação das médias, todos os parâmetros do modelo F (simplificado com $s=0,7$) rejeitaram a hipótese nula apresentando 99,9% de certeza de que o modelo difere das medições. Portanto, pode-se inferir que, em 1000 Hz, o modelo simplificado não possui semelhança acústica ao espaço urbano real, havendo diferenças bastante significativas entre eles. Já o modelo B (detalhado com α otimizado) não apresentou diferença estatística entre os parâmetros simulados e os obtidos nas medições, reforçando a necessidade de não reduzir a geometria em modelos que visam representar espaços urbanos.

3.2. A acurácia no espaço urbano em microescala

Para a análise da acurácia dos modelos virtuais da praça da FEC foi selecionado um modelo virtual com maior aderência às medições entre os modelos detalhados, e um entre os simplificados. A acurácia do modelo B (detalhado com α otimizado) e do modelo F

⁷ O “T-test” ou “Teste T de Student” foi utilizado por representar um método consagrado na estatística para testar hipóteses nulas.

(simplificado com $s=0,7$) foi analisada em função do grau de erro em relação a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros (*just noticeable difference* – JND) para cada parâmetro analisado segundo procedimento proposto por Bork [34].

Foi aplicado às médias de cada parâmetro em função da frequência, o erro dado por

$$\text{Erro} = \frac{|PA_{\text{medido}} - PA_{\text{simulado}}|}{\text{JND}} \quad (1)$$

em que PA_{medido} é o valor médio medido in situ do parâmetro acústico; PA_{simulado} é o valor médio simulado nos modelos virtuais do parâmetro acústico; e JND é a menor diferença percebida para o parâmetro acústico analisado.

Dessa equação, quanto mais próximo de zero o valor do erro, mais acurado o parâmetro investigado está.

A Figura 10 apresenta os erros em JND dos parâmetros T_{30} , EDT e SPL para o modelo B (detalhado com α otimizado) e o modelo F (simplificado com $s=0,7$), que a partir de agora serão tratados apenas como modelo detalhado e modelo simplificado.

Para T_{30} e EDT a tendência predominante da curva de erro é a mesma para os dois modelos. Mas a diferença no erro entre os modelos detalhado e simplificado é bastante significativa, chegando a 6 JND nas médias frequências em EDT e a 4 JND nas altas frequências em T_{30} .

Para esses dois parâmetros o modelo detalhado apresentou a melhor acurácia, apresentando o menor erro no JND, em relação aos resultados medidos. Isso ocorreu especialmente nas frequências de 1000 Hz e 2000 Hz com apenas 1 JND de erro em T_{30} , e até 1 JND em EDT para as frequências 500 Hz e 1000 Hz.

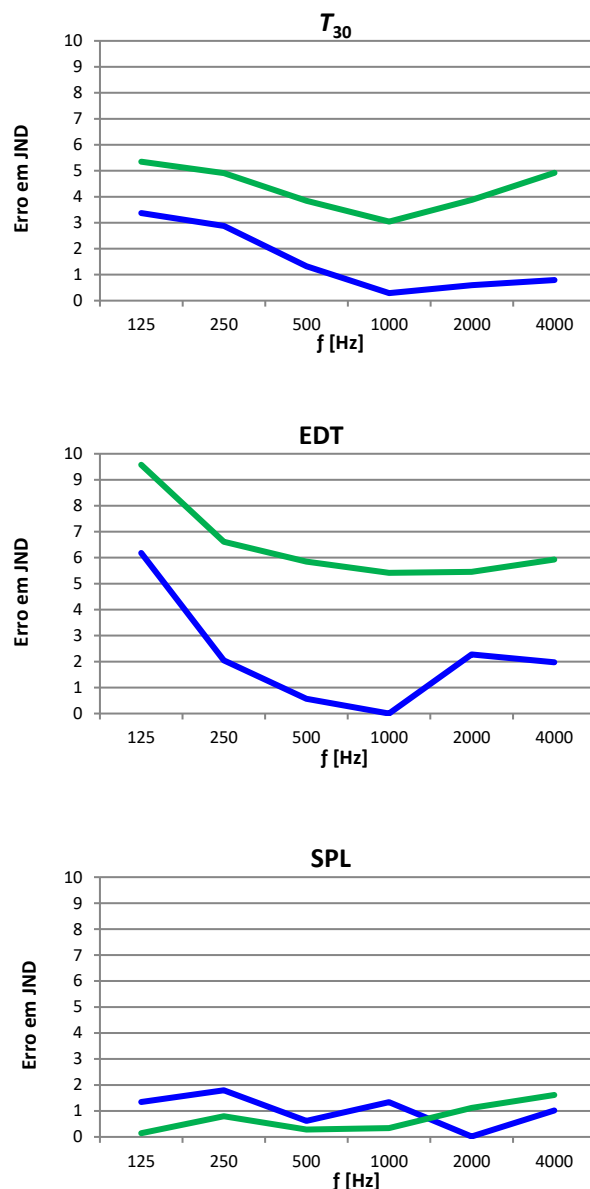


Figura 10: Erro em JND em função da frequência para T_{30} , EDT e SPL. Em verde o modelo simplificado, em azul o detalhado. Fonte: os autores.

Já no parâmetro SPL ambos os modelos apresentaram baixo grau de erro, chegando ao máximo de 2 JND. Ao contrário do T_{30} e EDT, o modelo simplificado apresentou os menores erros de JND para o parâmetro SPL.

Diante desse desempenho do SPL optou-se por complementar a análise considerando o erro em JND por ponto receptor na frequência de 1000 Hz como apresentado nos gráficos da Figura 11.

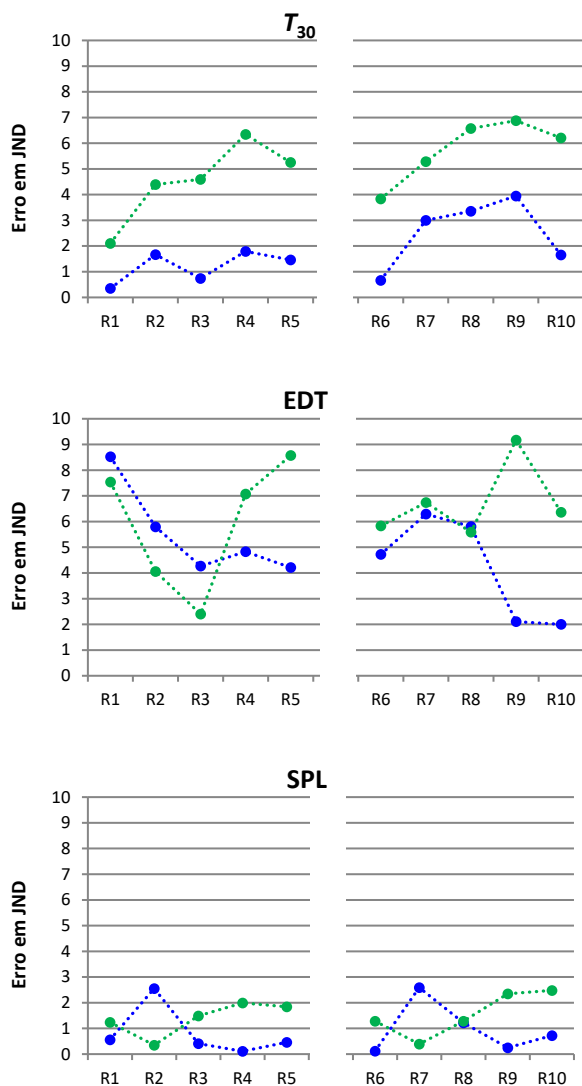


Figura 11: Erro em JND em função do ponto receptor para a frequência de 1000 Hz. Em verde o modelo simplificado, em azul o detalhado. Fonte: os autores.

Essa frequência foi selecionada por ter sido a mais acurada na análise geral de erro. Devido à forma de distribuição dos pontos receptores no espaço urbano pesquisado, posicionados no mesmo raio de distância à fonte sonora (Figura 3), os gráficos são apresentados segmentados, no primeiro bloco os receptores R1-R5, próximos às edificações, e no segundo bloco os receptores R6-R10 mais distantes das edificações e tendendo a reproduzir o campo livre.

Na análise do SPL em 1000 Hz foi identificado que no modelo detalhado predominaram erros abaixo de 1 JND na

maioria dos pontos receptores, enquanto o simplificado apresentou a maior parte dos pontos acima de 1 JND. Essa inversão de predominância de erros entre o SPL dos modelos detalhado e simplificado na análise de erro geral (Figura 10) e na análise de erro por ponto receptor (Figura 11) pode ser causada pela maior quantidade de energia sonora proporcionada pelo aumento do coeficiente de espalhamento do modelo simplificado. Esse aumento nos modelos virtuais é necessário para preencher os espaços vazios entre as reflexões mais fortes e obter uma curva de decaimento mais aderente às curvas obtidas com as medições *in situ* [35], como pode ser visto nas Curvas Tempo-Energia (*energy time curve* - ETC) do ponto receptor R2 (Figura 12). Isso indica que o erro geral em JND do SPL no modelo simplificado apenas aparenta, em média, se aproximar mais dos valores medidos, mas na análise de erro por ponto o mesmo não ocorre, continuando o modelo detalhado a apresentar de modo geral o menor erro em JND.

Para o parâmetro T_{30} a análise de erro por ponto em ambos os modelos revelou que existe menor possibilidade de erro nos pontos próximos às edificações (R1-R5) do que àqueles mais distantes em diagonal adentrando o espaço aberto que se aproximam mais do comportamento de propagação sonora em campo livre (R6-R10). Já no EDT o oposto predominou: pela maior relação de dependência em relação à posição do ponto receptor, os mais próximos da fonte e das edificações apresentaram os maiores erros. No geral, na análise por frequência no erro em JND por ponto revelou a predominância de maior acurácia no modelo detalhado.

Uma última análise abordou os valores absolutos para todos os parâmetros em função da distância (por ponto receptor) na frequência de 1000 Hz entre os modelos detalhado, simplificado e as medições.

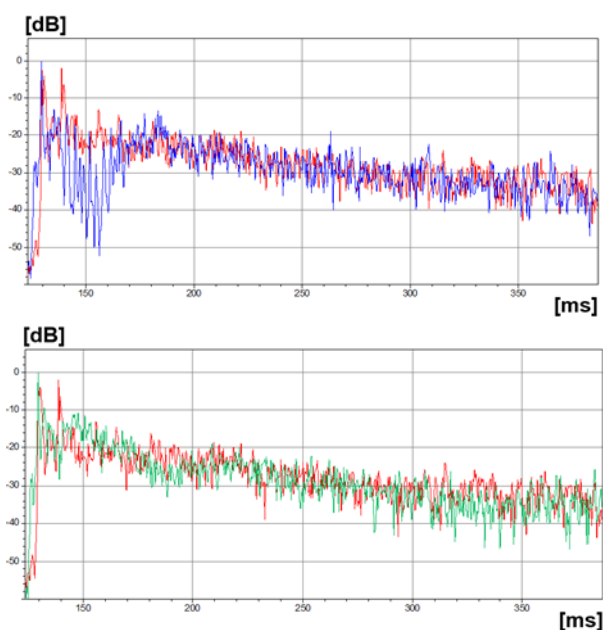


Figura 12: Sobreposição das ETC do ponto receptor R2. Em vermelho a curva medida *in situ*; em azul a curva do modelo detalhado; em verde a curva do modelo simplificado. Fonte: os autores.

A Figura 13 evidencia que os receptores mais distantes da fonte tendem a aumentar os valores de T_{30} e EDT com o aumento da distância à fonte sonora, até entrar em uma área de influência de propagação mais próxima do campo livre, e voltar a cair. Nesse sentido, o modelo detalhado conseguiu uma melhor aderência em relação aos valores medidos *in situ* do que o modelo simplificado. Também no modelo detalhado, foi identificado que a inserção dos detalhes arquitetônicos proporcionou uma melhor caracterização dos resultados dos receptores próximos às edificações (R1-R5), enquanto os pontos adentrando o campo livre (R6-R10) ficaram mais distantes dos valores medidos.

O resultado apresentado do aumento do T_{30} com a distância está vinculado à captação de reflexões tardias proporcionadas pelas edificações antes da perda de energia e entrada no espaço aberto. Esse comportamento de aumento do T_{30} em função da distância à fonte sonora também foi identificado em outras investigações de propagação sonora em espaços abertos [8,10,36–38].

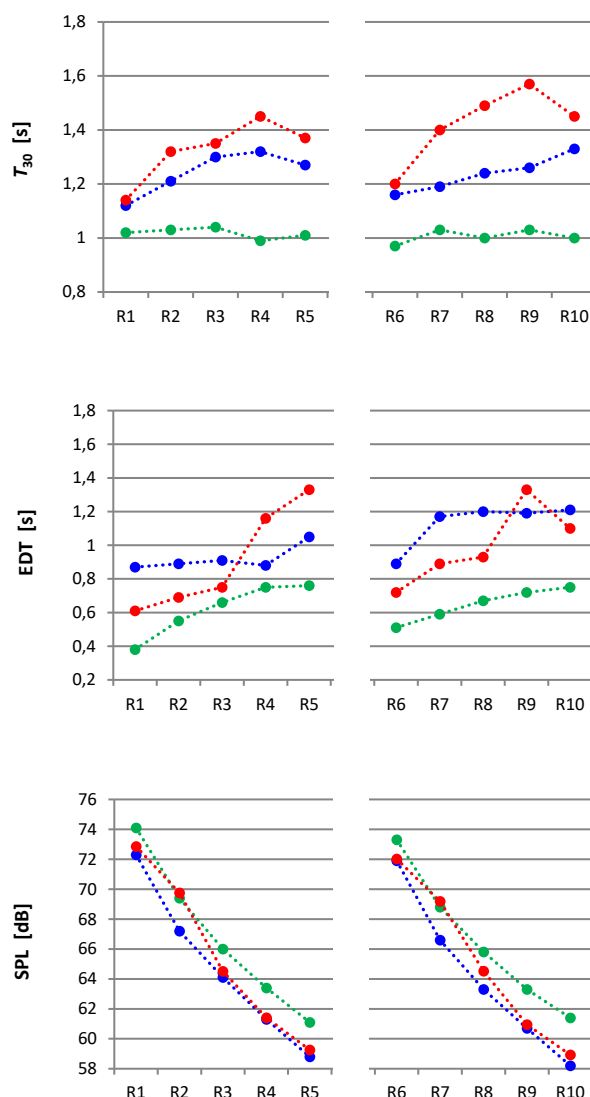


Figura 13: Valores absolutos em função da distância (ponto receptor) para 1000 Hz. Em vermelho as medições *in situ*; em azul o modelo detalhado; em verde o modelo simplificado. Fonte: os autores.

Esse aumento é causado por reflexões que surgem na parte posterior da fonte sonora chamadas de difusão posterior (*back-diffusion*). Em outras palavras, no espaço urbano e microescala o T_{30} apresenta comportamento que é comumente dependente da posição do ponto receptor. Isso revela que em espaços em microescala o T_{30} é altamente influenciado pelo contexto da morfologia urbana ao redor, e assim sendo influenciado pelos detalhes da forma das edificações.

No SPL a análise dos valores absolutos para a frequência de 1000 Hz confirma indícios que a determinação de um alto coeficiente de espalhamento para preencher a energia da resposta impulsiva no modelo simplificado em substituição aos detalhes da geometria existentes nas edificações leva ao superdimensionamento dos níveis de pressão sonora em todos os pontos receptores em relação aos níveis apresentados no modelo detalhado. Mas ainda assim, a variação encontrada é pequena e o comportamento dos modelos constante e estável.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Retomando o objetivo de estudo, esta pesquisa se propôs a identificar qual modelo virtual acústico, com a geometria detalhada ou simplificada, melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real, verificando a sua acurácia.

De modo comparativo, entre medições acústicas *in situ* e simulações computacionais de modelos virtuais realizadas, foi identificado que simulações fundamentadas em acústica geométrica a partir de métodos híbridos de cálculo, comumente utilizados em acústica de salas, também possuem um bom desempenho na representação acústica de espaços urbanos em microescala.

Apesar disso, algumas das recomendações aplicadas às salas, não são necessariamente as mesmas para espaços urbanos. Ratificou-se o exposto pelas poucas pesquisas em microescala urbana que comparam medições *in situ* e simulações virtuais: mesmo com as compensações normalmente utilizadas na redução da geometria dos modelos – como o aumento do coeficiente de espalhamento em modelos simplificados – aqueles com a geometria detalhada apresentaram maior aderência e acurácia na representação dos parâmetros acústicos medidos no espaço urbano real.

Verificou-se ainda que uma escolha criteriosa dos coeficientes de absorção para os materiais

das simulações demonstrou possuir importante influência para obtenção de resultados mais aderentes aos parâmetros existentes no espaço urbano real. Assim sendo, a possibilidade oferecida pelo *software* de otimizar os α por algoritmos genéticos foi bastante eficiente para ajuste dos coeficientes de absorção simulados aos existentes *in loco*. Ainda assim, a ferramenta de otimização deve ser utilizada com critério, conforme discutido no item 3.1, pois também foi evidenciado que seu uso pode possibilitar distorções bastante relevantes na caracterização dos materiais nos modelos apenas para induzir a coincidência dos valores calculados com os valores medidos.

Confirmou-se também, que a redução da geometria não é recomendada para esses espaços, uma vez que a presença dos detalhes arquitetônicos aumentou a precisão acústica entre a representação do modelo e o espaço urbano real. Isso ocorre por que em simulações de espaços urbanos em microescala – com a expressiva influência da absorção atmosférica – todas as reflexões possíveis derivadas das edificações serão importantes para serem calculadas nos pontos receptores antes de seguirem para serem 100% absorvidas pelas superfícies dos modelos que caracterizam o céu aberto. E a presença dos detalhes arquitetônicos nas simulações virtuais proporcionaram essas reflexões.

Por fim, apesar de raras as pesquisas de simulações virtuais em microescala urbana, a equivalência dos achados da literatura associados aos da presente pesquisa indicam que modelos com a geometria detalhada melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Alexandre Virginelli Maiorino e João Carlos Campos Vasconcellos Leite pela ajuda durante as medições, e, a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal

de Nível Superior do Ministério da Educação pela concessão de bolsa durante a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. KANG, J. Sound Propagation in Interconnected Urban Streets: A Parametric Study. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 28, n. 2, p. 281–294, 2001.
2. KANG, J. *Urban sound environment*. London: Taylor & Francis, 2007.
3. KANG, J.; MENG, Y.; BROWN, G. J. Sound propagation in micro-scale urban areas: simulation and animation. In: *Euronoise*, Nápoles, Itália: 2003.
4. ATTENBOROUGH, K.; LI, K.; HOROSHENKOV, K. *Predicting outdoor sound*. London: Taylor & Francis, 2007.
5. PROBST, W. Uncertainty and quality assurance in simulation software. In: *Noise mapping in the EU models and procedures*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
6. LYON, R. H. Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 55, n. 3, p. 493–503, 1974.
7. DAVIES, H. G. Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 64, n. 2, p. 517–521, 1978.
8. PICAUT, J.; SIMON, L. A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas. *Applied Acoustics*, v. 62, n. 3, p. 327–340, 2001.
9. KANG, J. Numerical modelling of the sound fields in urban streets with diffusely reflecting boundaries. *Journal of Sound and Vibration*, v. 258, n. 5, p. 793–813, 2002.
10. ONAGA, H.; RINDEL, J. H. Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades. *Applied Acoustics*, v. 68, n. 3, p. 310–325, 2007.
11. CAN, A.; FORTIN, N.; PICAUT, J. Accounting for the effect of diffuse reflections and fittings within street canyons, on the sound propagation predicted by ray tracing codes. *Applied Acoustics*, v. 96, p. 83–93, 2015.
12. EUROPEAN COMMISSION. *Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure*. WG-AEN. Versão 2. Versão final. 13 jan. 2006.
13. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R.; MAIORINO, A. V. Environmental noise performance: the detail of the building shape influence. In: *Internoise*, San Francisco, CA, USA: 2015.
14. FASTL, H.; ZWICKER, E. *Psychoacoustics: facts and models*. 3. ed. Berlin; New York: Springer, 2007.
15. LICITRA, G.; MEMOLI, G. Limits and advantages of Good Practice Guide to noise mapping. In: *Acoustic'08 Paris*. Paris: 2008.
16. KLÆBOE, R.; ENGELIEN, E.; STEINNES, M. Context Sensitive Noise Impact Mapping. *Applied Acoustics*, v. 67, n. 7, p. 620–642, jul. 2006.
17. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R. A acústica urbana e suas escalas de investigação. *Acústica e Vibrações*, v. 1, n. 48, p. 29–44, 2016.
18. TSAI, K.-T.; LIN, M.-D.; CHEN, Y.-H. Noise Mapping in Urban Environments: A Taiwan Study. *Applied Acoustics*, v. 70, n. 7, p. 964–972, 2008.
19. HORNIKX, M. Ten questions concerning computational urban acoustics. *Building and Environment*, p. 1–13, 2016.
20. HOWARTH, M. J.; LAM, Y. W. An assessment of the accuracy of a hybrid room acoustics model with surface diffusion facility. *Applied Acoustics*, v. 60, n. 2, p. 237–251, 2000.
21. KUTTRUFF, H. *Room acoustics*. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
22. CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G.; GIL, J. *ODEON room acoustics software version 13: user's manual*. Denmark: ODEON S/A, Scion DTU, 2016.

23. BORK, I. A comparison of room simulation software - the 2nd Round Robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 86, n. 6, p. 943–956, 2000.
24. BORK, I. Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part I: Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 91, n. 4, p. 740–752, 1 jul. 2005.
25. VORLÄNDER, M. Internacional Round Robin on room acoustical computer simulations. In: ICA, Trondheim, Noruega: 1995.
26. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R. Outros olhares para o espaço urbano em microescala: uma revisão narrativa de simulações virtuais fundamentadas em acústica geométrica. In: XXVIII Encontro da SOBRAC, Porto Alegre, RS: 2018.
27. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R.; MAIORINO, A. V. Reducing geometry or detailing? Comparison between measured and modeled microscale urban spaces. *POMA/ASA*, v. 28, n. 015011, 2017.
28. ROCHA, R. E. da; MAIORINO, A. V.; BERTOLI, S. R. Accuracy of computer simulation software using hybrid models for microscale urban environments. *POMA/ASA* v. 28, n. 015012, 2017.
29. EL DIEN HH, WOLOSZYN P. The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations. *Applied Acoustics*. v. 66, n.2, p.533–51, 2005.
30. MORI J, YOSHINO D, SATOH F, TACHIBANA H. Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique. In: *Internoise*. Osaka, Japão:2011
31. MORI J, SATOH F, YOKOYAMA S, TACHIBANA H. Prediction of outdoor sound propagation by geometrical computer modeling. *Acoustical Science and Technology*. v.35, n.1,p.50-54, 2014.
32. PAINI D, GADE AC, RINDEL JH. Agorá acoustics - Effects of arcades on the acoustics of public squares. In: *Forum Acoustics*, p. 1813–8. Budapeste, Hungria; 2005.
33. MORI J, YOSHINO D, SATOH F, TACHIBANA H. Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique. In: *Internoise*, p. 3079–83. Osaka, Japão: 2011.
34. BORK, I. A comparison of room simulation software - the 2nd Round Robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 86, n. 6, p. 943–956, 2000.
35. LISA, M.; HOLGER RINDEL, J.; CHRISTENSEN, C. L. Predicting the acoustics of ancient open-air theatres: the importance of calculation methods and geometrical details. In: *BNAM, Mariehamn, Finlândia*. Anais... In: *BNAM. Mariehamn, Finlândia*: 2004.
36. KANG, J. Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 107, n. 3, p. 1394–1404, 2000.
37. MENG, Y.; KANG, J. Combined ray-tracing and radiosity simulation for urban open spaces. In: *ICA, Madri, Espanha*. Anais... In: *ICA. Madri, Espanha*: 2007.
38. PICAUT et al. Experimental study of sound propagation in a street. *Applied Acoustics, Urban Acoustics*. v. 66, n. 2, p. 149–173, 2005.

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Mapa de ruído como ferramenta de diagnóstico e projeto

Gevú, N. V.¹; Fernandes, W. C.²; Cortês, M. M.³; Fagerlande, G. C.⁴; Niemeyer, M. L. A.⁵

¹⁻⁵ PROARQ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ,

{nayaragevu, wilmac29, marinamcortes, guilhermefagerlande, lygianiemeyer}@gmail.com

Resumo

Um dos maiores problemas ambientais nos grandes centros urbanos está relacionado à poluição sonora e suas consequências para a qualidade dos espaços livres, dos edifícios, como também os efeitos nocivos para a saúde do homem. O mapa de ruído é uma importante ferramenta de planejamento urbano para o estudo, diagnóstico e controle do ruído ambiental. A Europa se coloca na vanguarda com a Diretiva 2002/49/CE relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. No Brasil ainda não existe uma lei nacional que regulamente o mapeamento de ruído. Porém existem pesquisas que estão sendo realizadas nesse sentido. O presente trabalho apresenta o estado da arte dessa metodologia e expõe o desdobramento das pesquisas e produção técnica relacionadas ao mapeamento sonoro no Brasil, com destaque para os trabalhos acadêmicos realizados no Rio de Janeiro pelo Grupo de Pesquisa Projeto, Arquitetura e Sustentabilidade – GPAS / PROARQ / UFRJ. É relevante destacar que a pesquisa de mapa de ruído vem evoluindo no Brasil, e é importante que essa metodologia se expanda do âmbito acadêmico e faça cada vez mais parte da gestão e do planejamento urbano das cidades.

Palavras-chave: poluição sonora, mapa de ruído, acústica ambiental, projeto, planejamento urbano.

PACS: 43.20.Ye, 43.30.Zk, 43.50.Rq.

Noise mapping as a diagnostic and design tool

Abstract

One of the biggest environmental problems in the big urban centers is due to the noise pollution and their consequences for the quality of the open spaces, the buildings, as well as the harmful effects on human health. The noise mapping is an urban planning tool for the study, diagnostic and environmental noise control. The Europe is placed at the forefront with the Directive 2002/49/CE relating to the assessment and management of environmental noise. In Brazil there is not yet a national law regulating the noise mapping. There are, however, researches that have been taken in these ways. The present work presents the current state of the art of such methodology and sets out the researches and technical production explanation relating to noise mapping in Brazil, especially for the academic works which took place in Rio de Janeiro by the research group "Projeto, Arquitetura e Sustentabilidade – GPAS / PROARQ / UFRJ". It should be noted that the noise mapping research has been evolving in Brazil, and it's important that this methodology expands from the academic area and takes part in cities management and urban planning more and more.

Keywords: noise pollution, noise mapping, environmental acoustics, design, urban planning.

1. INTRODUÇÃO

A poluição sonora configura um dos maiores problemas ambientais nos grandes centros urbanos. Pode-se constatar suas consequências para a qualidade dos espaços livres, dos edifícios e os efeitos nocivos à saúde do homem.

Apesar de o ruído fazer parte da paisagem sonora das cidades, tem que ser gerido no sentido da não interferência com usos sensíveis, por exemplo, hospitais, residências ou escolas. O controle do ruído passa por uma gestão urbanística dos espaços da cidade e seus usos, dos seus meios de transporte e da dinâmica da própria cidade, sem esquecer a cultura de cada local.

O enquadramento legal, a nível nacional e municipal, e a fiscalização do seu cumprimento são de grande importância. É importante se avaliar de forma criteriosa o ambiente sonoro e o estabelecimento de planos de redução de ruído com a sua incorporação em planos de urbanização.

O procedimento de mapeamento de ruído é de grande contribuição para o processo de planeamento, diagnóstico e projeto urbano e arquitetônico. O mapa de ruído é uma representação gráfica do comportamento acústico de uma região, em um determinado momento, o que facilita a compreensão dos resultados. Assim, os níveis sonoros medidos ou calculados são representados de maneira semelhante às curvas topográficas de mapas convencionais, através de desenho gráfico, com possibilidades de diversos formatos como perspectivas, cortes, fachadas e no plano horizontal (como planta baixa), dependendo da escala de análise e objetivo do estudo.

A norma ISO 1996 – 2 recomenda identificar nos mapas os limites de cada curva por meio de cores padronizadas em intervalos de 5 dB(A) [1].

Este método permite que medidas de planeamento sejam tomadas para corrigir problemas existentes, bem como a avaliação de situações

futuras, a exemplo, o impacto do aumento do tráfego em uma avenida, a construção de um shopping, subsidiando um planejamento em longo prazo.

As finalidades do mapa de ruído são muitas, podendo ser desde a quantificação do nível de ruído existente, identificando as fontes emissoras e as áreas com níveis acima do admitido, como através da verificação do número de pessoas e de edificações sensíveis (habitações, escolas e hospitais) que estão sendo afetadas. Ele pode também criar diferentes cenários futuros e prever o impacto de novas estruturas e atividades. O que pode ser observado de mais comum é a identificação de áreas críticas, com valores de ruído muito elevados, normalmente excedendo às normas e legislações locais.

A aplicação do mapa de ruído na escala de uma quadra, verificando o número de pessoas afetadas ou como ferramenta de auxílio nas decisões projetuais, é o tipo de estudo mais escasso, diante da realidade da dificuldade dessa ferramenta chegar aos escritórios de arquitetura.

2. MAPA DE RUÍDO NA EUROPA

Desde a década de 1970 atividades referentes a mapeamento de ruído vem sendo executadas em países da Comunidade Europeia [2].

A Diretiva Europeia 2002/49/CE relativa à gestão e avaliação do ruído exige a elaboração de mapas estratégicos de ruído pelos seus Estados com mais de 250.000 habitantes, bem como para a implementação de grandes infraestruturas de tráfego, que deverão ser revisados e modificados a cada 5 anos, a partir de sua elaboração [3]. Esses mapas são utilizados pelos órgãos responsáveis para avaliar de forma global a exposição do ruído em toda a União Europeia e para identificar as prioridades para o planejamento de ações. Os mapas informam também ao público em geral a exposição do ruído a que estão submetidos, possibilitando que ações sejam desenvolvidas para controle da poluição sonora.

A produção mais significativa está concentrada em países da comunidade europeia, devido a real possibilidade de aplicação de estudos como base de conhecimento de planos de gerenciamento da poluição sonora.

Alguns exemplos podem ser encontrados em Murphy et al. [4] para a cidade de Dublin; Morillas et al. [5] para a cidade de Cárceres e Mendes e Silva [6] para Viana do Castelo.

Na França, o Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transportes Terrestres investem no desenvolvimento de metodologias simplificadas para Mapeamento de ruído [7], com base no uso de banco de dados atualizados de emissão sonora e de plantas cadastrais disponíveis on-line.

3. MAPA DE RUÍDO NO BRASIL

No Brasil, poucas são as cidades com mapa de ruído englobando a cidade como um todo, como por exemplo, Fortaleza/CE [8], Belém/PA [9,10] e Natal/RN [11].

A Prefeitura do Município de São Paulo regulamentou em 2016 a elaboração de mapa de ruído (Prefeitura do Município de São Paulo, Lei nº 16.499/2016) e em 2018 foi lançado o Mapa de Ruído Urbano Piloto de uma determinada região da Cidade [12].

Apesar de não ser exigido por legislação específica no Brasil, no contexto da pesquisa feita por universidades, a metodologia de mapa de ruído tem sido desenvolvida e amplamente aplicada como estudo em várias cidades brasileiras.

Barreto desenvolveu mapas de ruído para avaliar o impacto do ruído da construção subterrânea das linhas do metrô na cidade de Salvador/BA. Foram estudados tanto os efeitos nos ambientes internos de acordo com a tipologia de cada ambiente, quanto em ambientes externos [13]. O sistema ferroviário urbano estava planejado para funcionar como Ferrovia de superfície, atravessando uma área densamente povoada. Foi utilizado o SPRING gratuito associado ao software *HarmoNoise* [14].

Pinto e Mardones [15] desenvolveram um mapa de ruído para algumas vias do bairro de Copacabana na cidade do Rio de Janeiro usando o software CADNA-A. A validação realizada através de medições *in situ* na área central do bairro, apresentou discrepância de menos de 2 dB(A) em relação a valores calculados.

Na cidade de Belém, região norte do Brasil, Moraes e Simon avaliaram o impacto da implementação de um plano mestre de transporte para a região metropolitana. Da qual resultou num mapa de ruído do período de 2000 a 2009, realizada em uma base cartográfica criada no *ArcMap*, integrado ao software *Predictor Brüel & Kjaer* [16].

Na cidade de Águas Claras/DF, planejada no final de 1990, os mapas de ruído foram utilizados para avaliar a situação atual e cenários futuros. Simulou-se o desempenho acústico de barreiras para a proteção de lugares críticos. O software *SoundPLAN* foi usado, e as medições locais serviram para a calibração do mapa.

Em Aracajú/SE, realizou-se o mapeamento de ruído transversal de uma rua. A possibilidade de trabalhar com seções verticais (*Cross section*) permitiram uma melhor compreensão do efeito geométrico dos *canyons* urbanos que consiste nas áreas mais afetadas pelo ruído do tráfego viário. Além disso, a representação em seção também permite visualizar o efeito de barreiras acústicas, devido à própria topografia e/ou edifícios circundantes [17].

Lessa ao trabalhar com o mapeamento acústico na Favela Santa Marta - RJ propôs uma nova metodologia que se adequasse a característica urbana da área de estudo [18]. Como se tratava de uma favela localizada em um morro e sem circulação de veículos devido a sua topografia, as diversas fontes precisariam ser adaptadas, pois não havia no software tais modelos pré-estabelecidos. Foram feitas medições no local de estudo, através do monitoramento de longo prazo em locais fixos e utilizado o simulador acústico CADNAA.

A carta acústica da cidade de Fortaleza/CE apresentada no ano de 2012 durante o I Congresso Nacional Multidisciplinar de Ruído Ambiental Urbano e Ruído Aéreo (Unifor), é considerada uma experiência pioneira no mapeamento sonoro no Brasil, com intuito de servir como instrumento para redução da poluição sonora e melhoria da qualidade de vida do ambiente sonoro no município. Revelou-se, portanto, como uma ferramenta importante para o desenvolvimento sustentável, fornecendo à população e aos gestores subsídios para identificar e quantificar o problema da poluição sonora na cidade [19].

O projeto foi implantado através da Secretaria do Meio Ambiente de Fortaleza, sob a coordenação de Francisco Aurélio Chaves Brito e participação do professor José Luis Bento Coelho, especialista em Acústica do Instituto Superior Técnico de Lisboa.

No trabalho de Prange e Torres (2016), o cenário acústico existente de um trecho na cidade de Niterói é analisado e comparado com o proposto pelo governo, implantação de um túnel ligando uma região residencial à estação de barca. O modelo acústico da área foi construído por medições de ruído, dados de contagem de fluxo de veículos e levantamento de terra. O mapa de ruído gerado pelo modelo acústico foi validado por medições *in loco* e permitiu avaliar ambos os cenários [20].

Outros trabalhos também foram desenvolvidos no contexto acadêmico, como: Cantiere *et al.* (2010) na região central da cidade de Curitiba/PR [21]; Souza (2012) com o Bairro Imbuí em Salvador/BA [22]; Brasileiro (2017) com o Bairro Castelo Branco, em João Pessoa-PB [23]; Cortês (2013) com o Bairro de Petrópolis em Natal/RN [24]; Pinto (2013) com predição de ruído urbano para a construção do Estádio Arena das Dunas, em Natal/RN [25]; entre outros e em 2018 com o mapa acústico de toda a cidade de Natal.

A seguir serão apresentados trabalhos que foram desenvolvidos no âmbito de mapeamento de ruído na cidade do Rio de Janeiro pelo grupo de pesquisa GPAS (Grupo Projeto,

Arquitetura e Sustentabilidade), cadastrado no CNPQ e vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura (PROARQ) da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

3.1. Vargem Grande, Rio de Janeiro | 2014

O mapeamento acústico feito em Vargem Grande, Bairro localizado na Zona Oeste do Rio de Janeiro, foi elaborado para uma avaliação do impacto sobre o ambiente sonoro decorrente da interpretação dos parâmetros urbanísticos da legislação vigente, Lei Complementar 104/ 2009 – o “PEU das Vargens”. A pesquisa trabalhou em conjunto com o Grupo de Pesquisa Sistemas de Espaços Livres no Rio de Janeiro - SEL-RJ, que desenvolvia as bases cadastrais com os cenários urbanos atuais e futuros a serem analisados. Localizado em área de expansão urbana e de influência dos investimentos para as Olimpíadas de 2016, Vargem Grande sofreu forte pressão do mercado imobiliário. Com características rurais, com planícies, montanhas, sítios e casas de veraneio, foi ganhando feições urbanas com o surgimento de grandes loteamentos e condomínios [26].

A metodologia de avaliação envolveu a comparação dos mapas de ruído da situação existente na época, e do cenário futuro e a análise crítica do potencial de impacto das alterações morfológicas da paisagem urbana sobre o ambiente sonoro.

A figura a seguir mostra as áreas em que foram elaborados os mapas de ruído.



Figura 1: Áreas de simulação de mapa de ruído (adaptado de Google Earth, 2014 [26]).

Como exemplo, é apresentada a situação atual e cenário futuro da região do Haras (Figuras 2 e 3).



Figura 2: Situação atual (Google Earth, 2014 [26]).



Figura 3: Cenário futuro (adaptado de Google Earth, 2014 [26]).

Na situação existente, os níveis de ruído da Estrada dos Bandeirantes em frente ao Haras

se situaram na faixa de L_{Aeq} 66 a 69 dB. Níveis sonoros mais elevados são verificados no trecho que concentra o comércio local e o acesso a um parque aquático (borda esquerda do mapa). Na maior parte da área do mapa níveis de pressão sonora são inferiores à L_{Aeq} 50 dB.

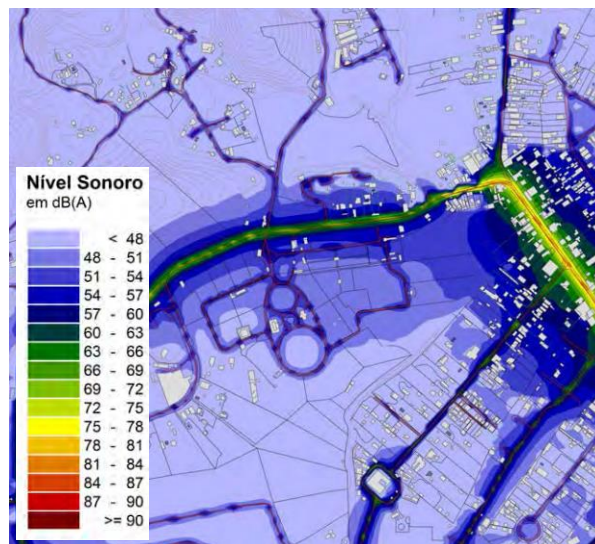


Figura 4: Mapa Cenário Existente [26].

O cenário futuro indicou o acréscimo significativo do nível sonoro ao longo da estrada dos Bandeirantes, devido ao aumento do volume de tráfego e à consequente redução da fluidez do escoamento. Verifica-se também elevação significativa do nível sonoro no entorno das edificações. Além do tráfego de veículos nas vias internas dos condomínios, deve ser também considerado o efeito da pavimentação das áreas de estacionamento.

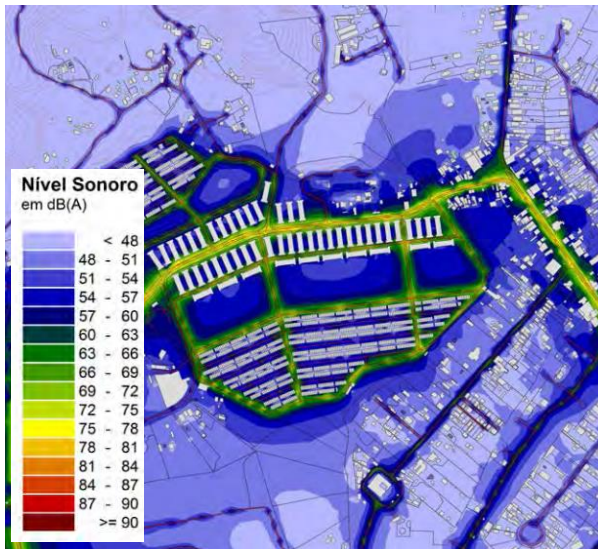


Figura 5: Mapa Cenário Futuro [26].

A pesquisa colaborou nas discussões sobre a problemática do PEU, que acarretou na suspensão das licenças de construção no PEU das Vargens pela Prefeitura do Rio de Janeiro e revisão da legislação (<http://glo.bo/1b9hdcR>, O Globo. Notícia publicada em 5/11/13 - 13h50).

3.2. Aterro do Flamengo, Rio de Janeiro | 2015

Este trabalho foi um estudo de caso realizado no Parque do Aterro do Flamengo, na Zona Sul do Rio de Janeiro. O parque, com projeto paisagístico realizado por Burle Marx, é uma das principais áreas públicas de lazer da cidade e apresenta grande diversidade sonora e de aspectos morfológicos de especial interesse para estudos de acústica ambiental.



Figura 6 e 7: Parque do Aterro do Flamengo [27].

A pesquisa utilizou uma combinação de métodos de medição, de simulação computacional e inventário das características físicas para análise do ambiente acústico do parque.

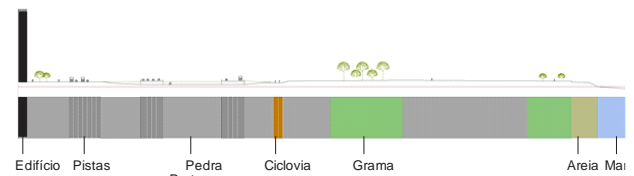


Figura 8: Desenho esquemático em corte do inventário físico [27].

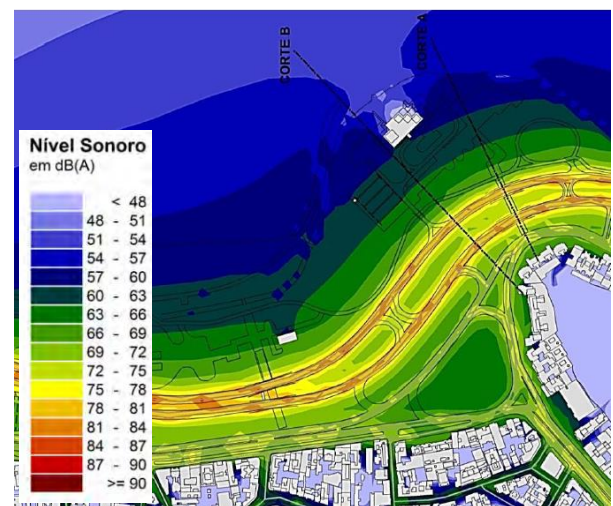


Figura 9: Mapa Horizontal [27].

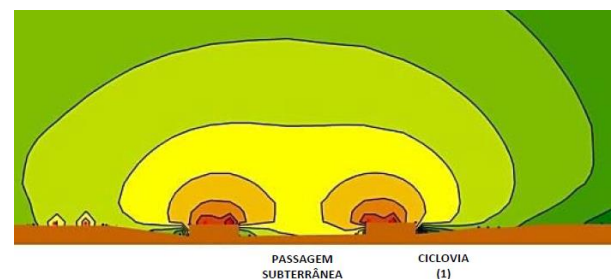


Figura 10: Corte A [27].



Figura 11: Foto do local do Corte A – pista com passagem de pedestre subterrânea [27].

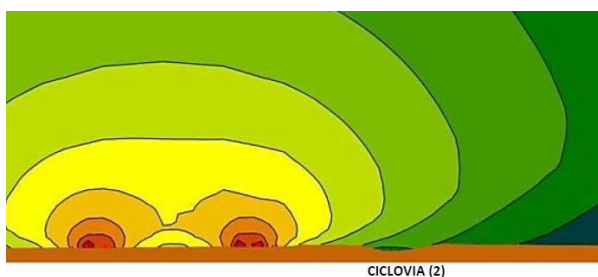


Figura 12: Corte B [27].



Figura 13: Localização do Corte B – ciclovia com desnível [27].

Apesar da proximidade com as vias expressas, que ligam o centro aos bairros da Zona Sul da cidade, foi observado que a hierarquização viária, os desníveis e taludes definidos pelo traçado urbano e paisagístico, reforçado com a absorção sonora do solo, criam espaços de grande qualidade acústica, protegendo os usuários do ruído do tráfego de veículos.

Por outro lado, a diversidade funcional, as atividades culturais, esportivas e de permanência dos usuários reforça a presença de sons da natureza e gera uma sonoridade rica e variada.

3.3. Ilha do Fundão, Rio de Janeiro | 2015

A pesquisa em questão apresenta os resultados da avaliação do impacto sonoro do terminal do BRT Transcarioca implantado no campus da Ilha do Fundão da Universidade Federal do Rio de Janeiro sobre os edifícios do entorno, em especial sobre o Instituto de Pediatria e Puericultura Martagão Gesteira.

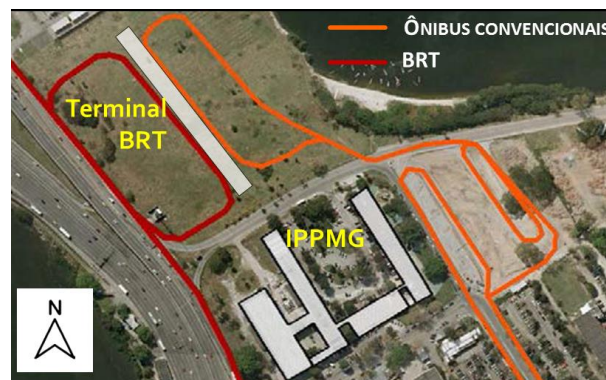


Figura 14: Aéreo (adaptado de Google Earth, 2015 [28]).

O mapa de ruído diurno indica a exposição da fachada oeste, paralela à Linha Vermelha e ao corredor do BRT, a níveis de ruído da ordem de L_{Aeq} 78 dB e das demais fachadas externas a níveis sempre superiores a L_{Aeq} 65 dB. As fachadas que são voltadas para o pátio interno estão um pouco mais protegidas, porém os níveis sonoros não se adequam às recomendações de L_{Aeq} 50 dB diurnos da NBR10151/2000, para áreas de entorno de hospitais ou de escolas, em nenhum ponto do mapa.

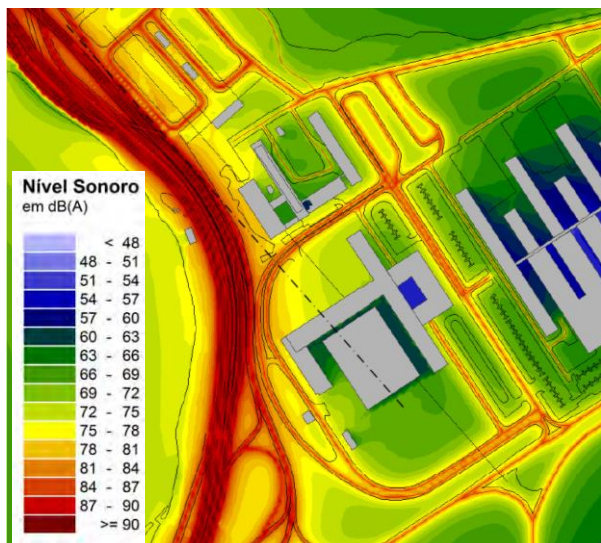


Figura 15: Mapa Horizontal [28].

3.4. Andaraí, Rio de Janeiro | 2016

Este trabalho descreve os parâmetros adotados para simulação e avaliação de desempenho de impacto ambiental de barreira acústica para o Renascença Clube, localizado na Zona Norte do Rio de Janeiro.

A barreira será implantada para mitigar o impacto sonoro sobre os edifícios do entorno causado pelas tradicionais Rodas de Samba que são realizadas no pátio interno do Clube.



Figura 16: Clube Renascença [29].

Vista entrando no clube, com quadra de ensaio da escola de samba ao fundo e cobertura existente à esquerda, onde ocorrem as rodas de samba.



Figura 17: Vista geral do pátio descoberto [29].

O estudo considerou três cenários de simulação, A (atual sem evento), B (atual com evento) e C (barreira acústica com evento).

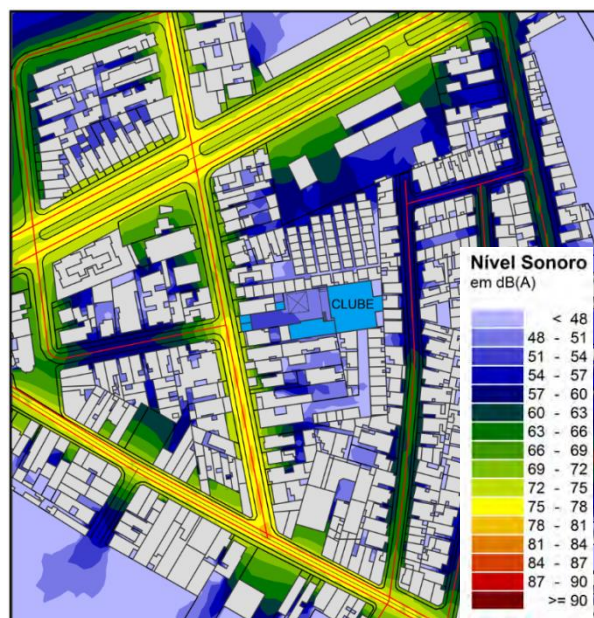


Figura 18: Mapa Cenário atual sem evento – Cenário A [29].

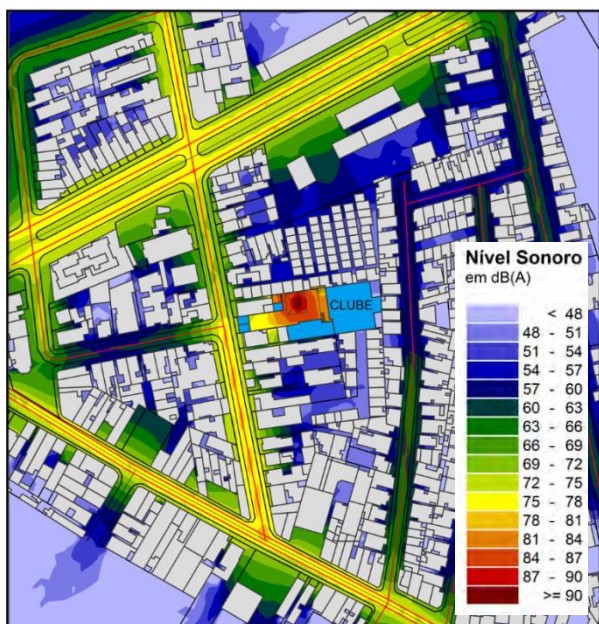


Figura 19: Mapa Cenário atual com evento – Cenário B [29].

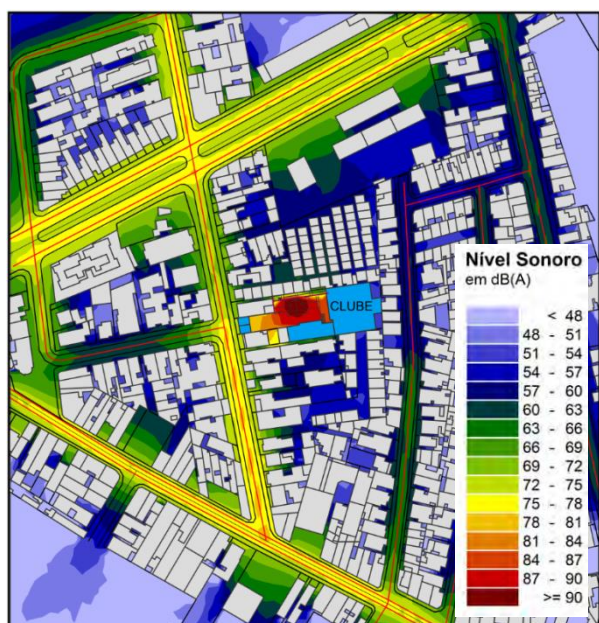


Figura 20: Mapa Cenário futuro com evento e barreira – Cenário C [29].

A comparação entre o mapa de ruído do cenário A e B, permite verificar que a realização do evento impacta de forma significativa o entorno imediato, em especial a vila ao lado. Esta situação é agravada pela ausência de muro entre o clube e as residências.

A implantação da barreira (cenário C) atenuará de forma significativa este impacto. A energia sonora redirecionada pela barreira

para o clube permitirá que o som seja reduzido e melhor ouvido pelo público no pátio interno do clube e na varanda do edifício em frente, que utilizam como camarote.

3.5. Botafogo, Copacabana e Barra, Rio de Janeiro | 2016

A pesquisa apresenta os diferentes cenários acústicos resultantes da propagação do ruído de tráfego rodoviário através de simulações com modelos teóricos elaborados de acordo com as características morfológicas observadas em três bairros do Rio de Janeiro: Botafogo, Copacabana e Barra da Tijuca.

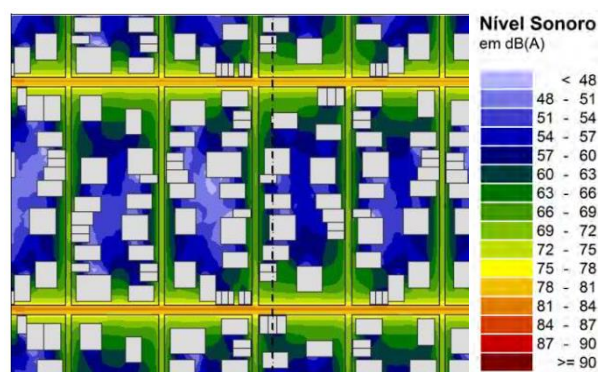


Figura 21: Mapa Botafogo [30].

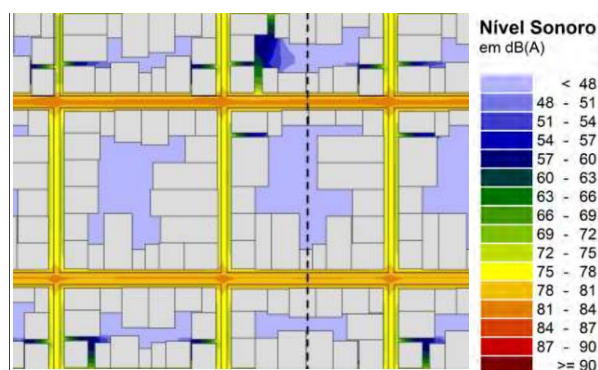


Figura 22: Mapa Copacabana [30].

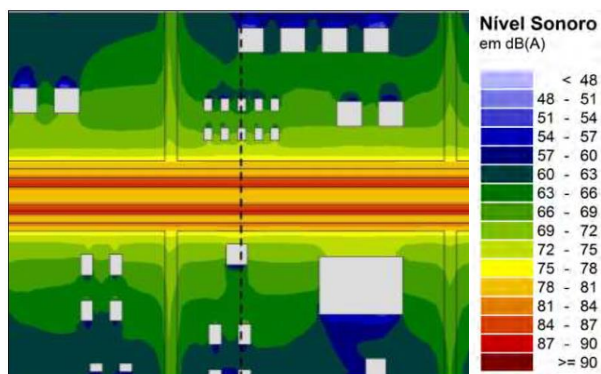


Figura 23: Mapa Barra da Tijuca [30].

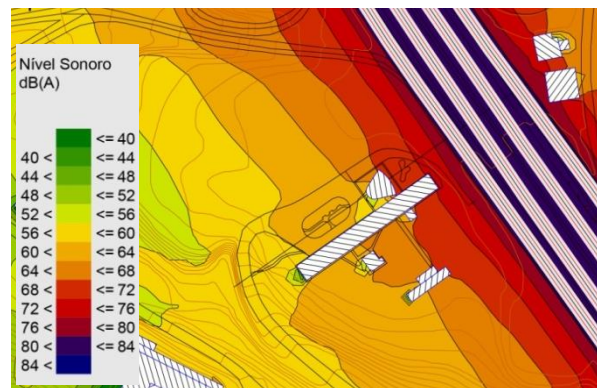


Figura 25: Mapa Horizontal [31].

Pode-se concluir que as diversas configurações urbanas influenciam decisivamente no cenário acústico dos locais. Portanto, é determinante para a regulamentação de parâmetros de atenuação sonora nas cidades.

3.6. Avenida Brasil, Rio de Janeiro | 2017

Este trabalho foi realizado para a compreensão da ambiência acústica do entorno do Pavilhão Arthur Neiva/Fiocruz, localizado na Zona Norte do Rio de Janeiro. O Pavilhão é composto de espaços sensíveis que desenvolvem atividades acadêmicas e de pesquisa que exigem concentração e silêncio, mas se localiza as margens da Avenida Brasil, via expressa de fluxo intenso, que gera constantes ruídos e vibrações.



Figura 24: O edifício e a Avenida Brasil (Evolução Urbana da Avenida Brasil, s.d [31]).

A partir dos resultados obtidos através de medições e de simulações foi possível afirmar que a Avenida Brasil, com seu tráfego intenso, causa influência sonora externa acima dos limites considerados ideais pela NBR 10151/2000, impactando significativamente no conforto acústico do ambiente de entorno do edifício e nas atividades que são desenvolvidas no pavilhão.

O mapa de ruído horizontal gerado apresenta limites sonoros elevados considerando principalmente o uso do edifício. Observa-se que o nível sonoro recebido pela fachada frontal (noroeste) se mantém entre L_{Aeq} 68 e 76 dB.

3.7. Lapa, Rio de Janeiro | 2018

A pesquisa feita no bairro da Lapa, Rio de Janeiro, teve como objetivo mapear o conjunto de vias e identificar os locais e fontes com maior contribuição para poluição sonora naquela área. A partir da contagem do fluxo de veículos, composição do tráfego nas vias, medição dos níveis de ruído advindos das vias e da movimentação das pessoas em torno dos bares e casas noturnas, além de gravações da paisagem sonora, foi feita a simulação computacional no software *SoundPLAN*. Foram criadas três situações para que se pudesse comparar e os resultados podem ser observados a seguir:



Figura 26: Mapa Cenário A – apenas Veículos [32].



Figura 27: Mapa Cenário B - Veículos e Pessoas [32].

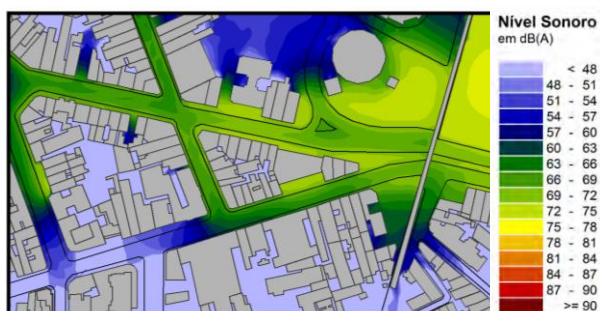


Figura 28: Mapa Cenário C – apenas Pessoas [32].

O cenário A representa a configuração padrão durante o dia, o cenário B a configuração padrão durante a noite e o cenário C um cenário hipotético, caso não houvesse a circulação de veículos.

A comparação entre os mapas horizontais de ambos os cenários A, B, e C, revelaram um impacto bastante significativo gerado pela movimentação das pessoas em torno dos bares e casas noturnas. Porém, constatou-se que ainda assim, o tráfego de veículos continua sendo a maior fonte de ruído nessa área.

3.8. Laranjeiras, Rio de Janeiro | 2018

A pesquisa tem o interesse em estudar o ambiente acústico da Rua Pinheiro Machado e seu entorno, devido à característica de alta poluição sonora em uma região majoritariamente residencial, com limite de nível de pressão sonora recomendado de L_{Aeq} 55 dB.

Os níveis de pressão sonora equivalente mais altos foram encontrados no Viaduto Eng. Noronha (próximo ao Túnel Santa Bárbara e no cruzamento com o túnel Jardel Filho), ao longo da Rua Pinheiro Machado e na Via Expres-

sa Praia de Botafogo. Estes valores chegam a L_{Aeq} 90dB em um trecho próximo ao túnel e num trecho da via expressa, e muitas vezes chegam a L_{Aeq} 85dB ao longo do Viaduto Eng. Noronha, da Rua Pinheiro Machado e na Praia de Botafogo.

Observa-se também que em trechos protegidos por edificações e relevo, como atrás do Palácio Guanabara, atrás da Universidade Santa Úrsula, e em alguns centros de quadras entre edificações, os valores de L_{Aeq} podem chegar a 45 dB, atendendo a norma.

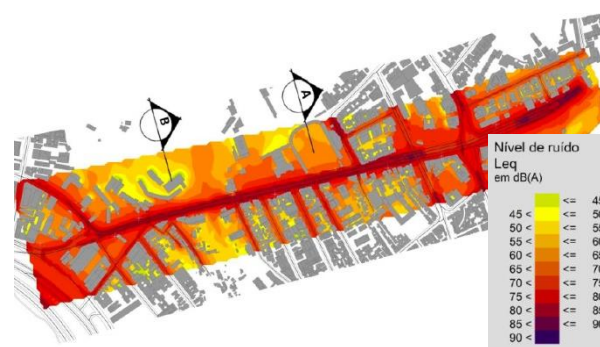


Figura 29: Mapa Horizontal [33].

Este trabalho mostra que os níveis de pressão sonora na área da Rua Pinheiro Machado encontram-se muito acima dos níveis exigidos pela norma NBR 10151/2000. Todos os pontos medidos ficaram acima da norma.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A poluição sonora é um dos fatores prejudiciais para a saúde da população. O estudo e a aplicação de ferramentas de análise do ruído são essenciais para a melhora da qualidade ambiental.

Como observado neste trabalho, a pesquisa de mapa de ruído vem evoluindo no Brasil, e é importante que essa metodologia se expanda do âmbito acadêmico e faça cada vez mais parte da gestão e do planejamento urbano das cidades.

O enquadramento legal, a nível nacional e municipal, e a fiscalização do seu cumprimento são de grande relevância. É importante se avaliar de forma criteriosa o ambiente sonoro

e o estabelecimento de planos de redução de ruído com a sua incorporação em planos de urbanização.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e à FAPERJ – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, pelo suporte técnico e financeiro disponibilizados.

REFERÊNCIAS

1. GUEDES, I. C. M.; BERTOLI, R. S. M. *Mapa acústico como ferramenta de avaliação de ruído de tráfego veicular em Aracaju – Brasil*. Unicamp, 2015.
2. IMAGINE - *Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment. State of the Art - Deliverable 2 of the IMAGINE project*. IMAGINE, 2004. Disponível em: <https://ec.europa.eu/research/fp6/ssp/imagin_e_en.htm>.
3. DIRETIVA 2002/49/CE DO PARLAMENTO EUROPEU e do Conselho, de 25 de junho de 2002, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente – *Declaração da Comissão no Comitê de Conciliação da diretiva relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente*. Jornal Oficial nº L 189 de 18/07/2002 p. 0012 – 0026.
4. MURPHY, E.; RICE, H. J.; MESKELL, C. *Environmental noise prediction, noise mapping and GIS integration: the case of inner Dublin, Ireland*. East-European Acoustical Association, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10197/3000>>.
5. MORILLAS, J. M. B.; ESCOBAR, V. G.; SIERRA, J. A. M.; GÓMEZ, R. V.; CARMONA, J. T. *An environmental noise study in the city of Cárceres, Spain*. Applied Acoustics, v. 63, n. 10, p. 1061-1070, 2002.
6. MENDES, J. F. G.; SILVA, L. T. *Indicadores de alteração global do clima acústico. Uma metodologia de análise para monitoramento do ruído urbano*. In: Proceedings of 2nd Congresso Luso-Brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável, Braga, Portugal, 2006.
7. NIEMEYER, M. L. A.; MARTINS, T. A. L. *Towards Sustainable Urban Planning for Brasil cities: A know ledge – base integrate environmental predictive date into a DSS*. Toulouse, France, 2012.
8. BRITO, F; COELHO, B. *The creation of the noise map of the city of Fortaleza*. In: INTERNOISE, 13, 2013.
9. MORAES, E. M. L. *Poluição sonora em Belém – Brasil: identificação, caracterização e medidas de controle do ruído urbano*. II Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento, Urbano, Regional, Integrado e Sustentável. In: Anais do PLURIS 2006, Portugal, 2006.
10. MORAES, E. M. L. *Mapa acústico de Belém: Previsão do nível de ruído ambiental através de método de simulação computacional. Relatório de pesquisa*. Belém, 2010.
11. FLORÊNCIO, D. N. P. *Avaliação do mapa sonoro de tráfego veicular no Município de Natal/RN*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Natal-RN, 2018.
12. INAD SP - INTERNATIONAL NOISE AWARENESS DAY – SÃO PAULO. *Mapa de ruído urbano: projeto piloto SP*. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.mapaderuidosp.org.br>>.
13. BARRETTO, D. M. *Impacto Sonoro da Implantação do Metrô de Salvador em Edificações adjacentes considerando os efeitos na população*. Salvador, 2008.

14. CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. *Spring: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling*. Computers & Graphics, v. 20, n.3, p. 395-403, 1996.
15. PINTO, F.; MARDONES, M. *Noise mapping of densely populated neighborhoods: example of Copacabana, Rio de Janeiro – Brazil*. Environmental Monitoring and Assessment. v. 155, p. 309-318, 2009.
16. MORAES, E.; SIMON, F.; GUIMARÃES, L. H. *Mapa de Prediccion del Ruido Ambiente en Belém – Brasil*. In: Anais do X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Natal, 2009.
17. GUEDES, I. C. M. *Influência da forma urbana em ambiente sonoro: um estudo no bairro Jardins em Aracajú (SE)*. Dissertação (Mestrado) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2006.
18. LESSA, B. P. V. *Avaliação de Poluição Sonora em Assentamento Informal: Estudo de caso Comunidade Santa Marta - RJ*. Dissertação (Mestrado) - UFRJ, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2012.
19. BRITO, F.; COELHO, B. *The creation of the noise map of the city of Fortaleza*. In: INTERNOISE, 13, 2013.
20. PRANGE, S. P.; TORRES, J. C. B. *Noise impact of urban mobility changes: Charitas tunnel case study*. In: SBE16 Brazil & Portugal, 2016.
21. CANTIERE, E.; CATAI, R. E.; AGNOLETTI, R. A.; ZANQUETA, H. F. B.; CORDEIRO, A. D.; ROMANO, C. A. *Elaboração de um mapa de ruído para a região central da cidade de Curitiba – PR*. Revista Produção Online, Associação Brasileira de Engenharia de Produção – ABEPRO, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, v. 10, n. 1, 2010.
22. SOUZA, D. F. M. *Mapeamento acústico do ruído de tráfego rodoviário do bairro Imbuí, Salvador - Ba*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura, Bahia, 2012.
23. BRASILEIRO, T. C. *Mapeamento sonoro: estudo do ruído urbano no bairro Castelo Branco, em João Pessoa - PB*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Arquitetura, Natal, 2017.
24. CORTÊS, M. M. *Morfologia e qualidade acústica do ambiente construído: estudo de caso em Petrópolis, Natal/RN*. Dissertação (Mestrado) - UFRJ, PROARQ, Programa de Pós-graduação em Arquitetura. Rio de Janeiro: UFRJ/FAU, 2013.
25. PINTO, D. N. *Mapeamento sonoro como ferramenta para Predição de Ruído urbano na área de influência do estádio Arena das Dunas, Natal/ RN*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
26. NIEMEYER, M. L. A. ; CORTÊS, M. M.; PAREDES, L. A. ; FERNANDES, W. C ; CHAVES, M. L. C. N. S. C. ; AGUIAR, F. M. *Influência de Legislação de Uso do solo na Configuração do Ambiente Sonoro: O PEU das Vargens*. In: XXV Encontro SOBRAC, 2014, Campinas - SP. XXV Encontro SOBRAC, 2014.
27. NIEMEYER, M. L. A. ; CORTÊS, M. M.; AGUIAR, F. M.; CHAVES, M. L. N. *Metodologia para avaliação acústica de espaços livres (Parque do Aterro do Flamengo, RJ)*. In: Euro Elecs, 2015.
28. NIEMEYER, M. L. A. ; FERNANDES, W. C ; ROCHA, R. B. ; AGUIAR, F. M. *Avaliação do Ambiente Sonoro do Entorno do Terminal BRT. Campus UFRJ, Ilha do Fundão*. ENCAC, v. 1, p. 1-6, 2015.

29. NIEMEYER, M. L. A.; CORTÊS, M. M.; GEVÚ, N. V. *Acoustic barrier for outdoor music event: The “roda de samba” in Rio de Janeiro*. In: ICA, 2016.

30. NIEMEYER, M. L. A. ; ROCHA, R. B.; FERNANDES, W. C ; CORTÊS, M. M.; AGUIAR, F. M. *Simulação Acústica de ruído de tráfego em três configurações urbanas*. In: Pluris, 2016, Maceió. Pluris, 2016.

31. GEVÚ, N. V. *Projeto de intervenção para o Pavilhão Arthur Neiva/Fiocruz: estudo da vibração e do ruído rodoviário como fator de dano em bem moderno tombado*. Dissertação (Mestrado) - UFRJ, PROARQ, Programa de Pós-graduação em Arquitetura. Rio de Janeiro: UFRJ/FAU, 2017.

32. FERNANDES, W. C.; NIEMEYER, M. L. A.; FAGERLANDE, G. *Mapeamento sonoro como ferramenta para análise do ambiente sonoro no corredor cultural do bairro da Lapa, Rio de Janeiro*. In: XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Sobrac 2018. Porto Alegre, 2018.

33. FAGERLANDE, G.; NIEMEYER, M. L. A.; TORRES, J. C. B. *Avaliação do ruído urbano na Rua Pinheiro Machado e seu entorno, Laranjeiras, Rio de Janeiro*. In: 14ª Jornada Urbanere, 2018.

Instruções e modelo de artigo para a Revista Acústica e Vibrações (2018–2021)

Fonseca, W. D'A.¹ 

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, will.fonseca@eac.ufsm.br

Resumo

Esse campo é destinado ao resumo do artigo que deve ter entre 180 e 300 palavras. O resumo, palavras-chave, PACS, *title*, *abstract* e *keywords* constituem a primeira página do artigo, não devendo estender-se para outra página. O resumo deve fazer uma apresentação concisa do artigo técnico científico, contendo, uma introdução, o objetivo, uma síntese da metodologia, o principal resultado e a principal conclusão (preferencialmente nessa ordem). Assim, o leitor pode conhecer a essência do conteúdo do artigo. Lembre-se que o resumo é como o *trailer* de um filme, as pessoas ficarão interessadas em ler completamente o artigo se o resumo lhes interessar. O resumo não deve conter informações novas não contidas no artigo; abreviações indefinidas; discussão prévia de outra literatura; referências e citações e excesso de detalhes acerca dos métodos empregados. Ele também não é o parágrafo de introdução do documento, isso deve ser colocado no início do texto. Utilize apenas informações úteis e relevantes, faça um exercício de empatia com o possível leitor interessado. Para se obter um resumo coeso, elegante e de acordo com o artigo, escreva uma prévia, realize a escrita completa do documento e, ao final, revise-o observando se o conteúdo dele reflete de forma consistente o teor do documento. Seguindo o resumo, o autor deve listar até 5 palavras chaves (evite colocar as mesmas palavras que formam o título do artigo). Após essa etapa, há ainda os PACS, que são um sistema de classificação hierárquica (mais detalhes no texto) e, em consequente, título, resumo e palavras-chave em inglês.

Palavras-chave: artigo técnico, revista da Sobrac, acústica, áudio, vibrações.

PACS: 43.66.Pn, 43.20.Ye, 43.60.-c, 43.50.Yw, 43.60.Qv.

Instructions and article template for Acoustics and Vibration Journal (2018–2021)

Abstract

This field is intended for the abstract of the article that must contain between 180 and 300 words. The items *resumo*, *palavras-chave*, PACS, *title*, *abstract*, and *keywords* constitute the first page (i.e., they must not extend to the following page). The abstract should make a concise presentation of the scientific-technical article, containing an introduction, the objective, a synthesis of the methodology, the main result and the final conclusion (preferably in that order). Thus, the reader may acknowledge the essence of the article content. Remember that the abstract is like a movie trailer, people will consider reading the complete article if the abstract is interesting. The abstract should not contain new information not contained within the article; undefined abbreviations; previous discussion of another literature; references and citations or excessive detail about the methods employed. It is also not the introductory paragraph of the work; this should be placed at the beginning of the text. Use only relevant and useful information, exercising empathy with prospective readers. For a cohesive, elegant abstract that represents the article, write a preview, write the paper completely, and then review it by looking at whether its content consistently reflects the content of the document. Following the abstract, the author should list up to 5 keywords (avoid using the same words contained in the article's title). After this step, there are also the PACS, which are a hierarchical classification system (more details within the text) and, finally, title, abstract and keywords in English (PACS are only put after *resumo* in portuguese contributions).

Keywords: technical article, Sobrac's journal, acoustics, audio, vibration.

1. INTRODUÇÃO

Este texto de instruções foi elaborado para que os autores possam apresentar os artigos de forma padronizada. Isso facilitará muito o trabalho de revisão e diagramação, proporcionando uma uniformidade de texto para os artigos completos, de acordo com a linha temática específica. Neste modelo são apresentadas as principais diretrizes para a elaboração do artigo completo no que diz respeito à apresentação de conteúdo, gráfica, estrutura e ao procedimento para a submissão dos artigos. Este documento já possui a formatação de estilos personalizados para a elaboração do texto. O autor pode, portanto, utilizar este arquivo como modelo para esta finalidade. Serão disponibilizados modelos (*templates*) em Microsoft Word (.docx) e L^AT_EX (.tex). Esta versão também está disponível no [Overleaf](#). Os autores são responsáveis por enviar os artigos de acordo com o modelo vigente da revista.

O texto completo deverá estar em espaçamento simples entre linhas, tipografia Times New Roman tamanho 12 pt e parágrafo com espaçamento de 0 pt antes e 12 pt depois. É de prática comum a escrita de artigos científicos no impresso, logo recomenda-se essa prática. Além disso, serão aceitos em língua culta portuguesa, inglesa¹ e espanhola, ou ainda artigos bilíngues.

2. DOCUMENTO E APRESENTAÇÃO

Sempre coloque texto em seções e subseções, não as deixe órfãs (abrindo uma seção e passando direto para a subseção).

2.1 Primeira página

A primeira página deve conter os seguintes itens colocados pelos autores: título, autores, filiações, resumo, palavras-chave, PACS, *title*, *abstract* e *keywords*. As informações acerca de recepção, aceitação, publicação e DOI (*Digital Object Identifier*) serão adicionados pelos edi-

tores após a aprovação do artigo. Caso o título completo seja muito extenso, pede-se uma versão curta para que seja incluída no cabeçalho das páginas do artigo. Ademais, os autores devem elaborar uma frase que diga o assunto do artigo, essa informação será usada nos metadados do PDF final. Além do artigo, na submissão, é necessário o envio dos dados em planilha de dados específica (em .xlsx fornecida pelos editores). Pede-se para que os autores se registrem no [ORCID](#) buscando a completude de informações para o DOI, além de figurar o *link* para cada autor na primeira página.

O resumo do artigo poderá ter entre 180 e 300 palavras. O resumo, palavras-chave, PACS, *title*, *abstract* e *keywords* constituem a primeira página do artigo, não devendo estender-se para outra página. Ele deve fazer uma apresentação concisa do artigo técnico científico, contendo uma introdução, o objetivo, uma síntese da metodologia, o principal resultado e a principal conclusão (preferencialmente nessa ordem). Assim, o leitor pode conhecer a essência do conteúdo do artigo. Lembre-se que o resumo é como o *trailer* de um filme, as pessoas ficarão interessadas em ler completamente o artigo se o resumo lhes interessar. O resumo não deve conter informações novas não contidas no artigo; abreviações indefinidas; discussão prévia de outra literatura; referências e citações e excesso de detalhes acerca dos métodos empregados. Ele também não é o parágrafo de introdução do documento, isso deve ser colocado no início do texto. Utilize apenas informações úteis e relevantes, faça um exercício de empatia com o possível leitor interessado. Para se obter um resumo coeso, elegante e de acordo com o artigo, escreva uma prévia, realize a escrita completa do documento e, ao final, revise-o observando se o conteúdo dele reflete de forma consistente o teor do documento.

Seguindo o resumo, o autor deve listar até 5 palavras chaves (evite colocar as mesmas palavras que formam o título do artigo).

Após essa etapa, há ainda a apresentação de 3-5 códigos PACS (*Physics and Astronomy Classification Scheme*), que são um sistema de classi-

¹Artigos em língua estrangeira internacionalizam a revista e alcançam um público maior. Eles devem ser revisados por revisores profissionais, seja em inglês ou espanhol.

ficação hierárquica criado pelo American Institute of Physics (AIP), que ajuda a identificar campos e sub-campos em física e assuntos relacionados. Essa classificação é utilizada em artigos de revistas (ou *journals*) internacionais, bem como também em algumas conferências. Os códigos são compostos por números e letras, por exemplo, “43.20.Dk” que diz respeito a “*Ray acoustics*”. Os autores devem buscar as classificações mantidas e recomendadas pelo Journal of the Acoustical Society of America nos endereços:

- <https://asa.scitation.org/jas/authors/manuscript>
- https://asa.scitation.org/pb-assets/files/publications/jas/Acoustics_PACS-1548697226033.pdf

Os PACS devem ser colocados após o resumo em contribuições em português, após o *abstract* em contribuições em inglês e após o *resumen* em contribuições em espanhol.

Na filiação dos autores use números como marcas e caso existam autores de uma mesma instituição, utilize apenas um endereço e os diferencie nos emails. Quando existirem emails de um mesmo domínio, busque reduzir usando chaves {}. Utilize no máximo duas linhas para a filiação de cada autor de instituições diferentes. Preste atenção nos exemplos:

- Fonseca, W. D'A.¹; Sobrenome, N.²
^{1,2} Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS,
will.fonseca@eac.ufsm.br,
nome@dominio.br.
- Fonseca, W. D'A.¹; Mareze, P. H.²
^{1–2} Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS,
{will.fonseca, paulo.mareze}@eac.ufsm.br.
- Fonseca, W. D'A.¹; Sobrenome, N.²,
Mareze, P. H.³
^{1,3,2} Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS,
{will.fonseca, paulo.mareze}@eac.ufsm.br,
nome@dominio.br.

- Fonseca, W. D'A.¹; Sobrenome, N.²

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS,
will.fonseca@eac.ufsm.br.

² Laboratório de Vibrações, Instituição,
Cidade, SC, nome@dominio.br.

Artigos em língua inglesa deverão conter *title*, *abstract*, *keywords*, assim como título, resumo e palavras-chave em português (nessa ordem). Da mesma forma, artigos em espanhol deverão conter *título*, *resumen*, *palabras clave*, assim como *title*, *abstract*, *keywords* em inglês (nessa ordem).

2.2 Número de páginas

O trabalho completo deve conter de 7 a 20 páginas, contando entre introdução e o final das considerações finais, isto é, a primeira página e eventualmente a seção de referências não contam para esse número. São admitidos apêndices, depois das referências, desde que estes não ultrapassem duas páginas. Demais situações não previstas serão analisadas pela comissão editorial.

Como forma de otimizar ao máximo o conteúdo de cada página, as figuras, tabelas, quadros e códigos devem ser apresentados ao longo do corpo do texto (em uma ou duas colunas dependendo de seu conteúdo).

2.2.1 Exemplo de subseção de dois níveis

Esta é uma subseção de dois níveis para efeito de exemplificação.

2.3 Tamanho da folha e margens

O texto deve ser configurado em folha do tamanho A4 (210 × 297 mm), em duas colunas (espaçamento 1,25 cm), com numeração distinta de página pares e ímpares (como está neste documento). As margens esquerda, direita e inferior deverão ter 2,00 cm e a superior deverá ter 2,60 cm. Procure utilizar toda a área disponível. Exceções podem ser admitidas, por exemplo, quando for necessário começar uma nova seção, título, subtítulo ou legenda: esses poderão ser alocados no início da página seguinte.

2.4 Caracteres e texto

Os textos deverão ser escritos em tipografia Times New Roman. O título do artigo deverá estar na primeira página, alinhado à esquerda, **em negrito**, com apenas a primeira letra em maiúscula (exceto nomes próprios), corpo 18 pt e parágrafo com espaço de 22 pt depois. Os títulos das seções deverão ser em negrito, corpo 12 pt, em maiúsculas, conforme apresentado neste modelo. Subseções em negrito, corpo 12 pt, apenas com a primeira letra em maiúscula (a não ser que existam nomes próprios). O texto do documento deve ter espaçamento simples, corpo 12 pt, justificado e sem recuo na primeira linha. Evite o uso de subseções com mais de três níveis e, para isso, busque usar um sistema de listas.

Utilize linguagem culta e científica em seu texto². Palavras estrangeiras deverão ser grafadas em itálico (por exemplo, como em *proceedings*). Siglas, acrônimos, abreviaturas e/ou outras construções que fogem ao conhecimento comum devem ser apresentadas ao leitor, por exemplo, HRTF (*Head-Related Transfer Function*). Faça revisões gramaticais e de cunho técnico antes da submissão.

2.5 Espaçamento entre linhas e parágrafos

Deve-se empregar espaçamento simples entre linhas, como já adotado neste arquivo de instruções. Na formatação dos parágrafos escolher a opção parágrafo justificado (com espaçamento de 12 pt).

2.6 Equações e unidades

Serão adotadas as unidades do Sistema Internacional (SI). Ao escrever números, **use o separador decimal vírgula** (conforme a língua portuguesa vigente) seja no texto, tabelas, figuras e/ou gráficos, além de buscar sempre o uso de uma mesma precisão ao comparar números, por exemplo: 3,0 é diferente de 3,00, porém tem a mesma precisão de 6,0. Ao escrever um número com sua unidade, mantenha sempre o

número junto à correspondente unidade, sem que exista quebra de linha entre eles (no Ms Word utilize Ctrl + Shift + Espaço, no L^AT_EX coloque um til (~) entre o número e a unidade). Por exemplo, 3 m de distância separa a entrada e a saída; 4.512,28 cm é a distância medida.

As equações deverão estar encaixadas em uma “tabela” simples conforme o exemplo da Equação (1). Deverão ainda estar centralizadas e numeradas sequencialmente, com a numeração colocada no canto direito (vide exemplo). Lembre-se que elas são elementos textuais, logo devem ser pontuadas e o texto consequente eventualmente não se inicia com letra maiúscula. Recomenda-se colocar a nomenclatura imediatamente após a variável apresentada.

A área do círculo (em m²) é dada por

$$A = \pi r^2, \quad (1)$$

em que r é o raio em metros (m). Lembre-se que variáveis (como o r nesse exemplo) são grafadas em *itálico* (seja na equação ou no texto). Porém, **unidades e operadores matemáticos são escritos “em pé”**, sem a aplicação do itálico. Por exemplo, 32,0 N/m² foi a pressão aplicada, ou ainda

$$\int_a^b p(\phi) d\phi \quad (2)$$

foi a integral calculada (observe que o operador diferencial “d” está em pé), para cada ângulo ϕ em graus.

Texto subscrito e sobrescrito somente será em itálico se for correspondente a alguma variável pertinente. Caso seja um “nome complementar”, a variável deve ser colocada em pé, por exemplo, P_{total} corresponde à pressão total em Pa, ou ainda S^{tri} corresponde à área do triângulo em cm². O somatório foi calculado considerando P_i até a i -ésima pressão final correspondente a 256.

Caso texto ou siglas sejam utilizados em equações, sua representação deve ser em pé, por exemplo:

$$\text{densidade} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}, \quad (3)$$

²Notas de rodapé podem ajudar a aclarar pequenos detalhes e comentários.

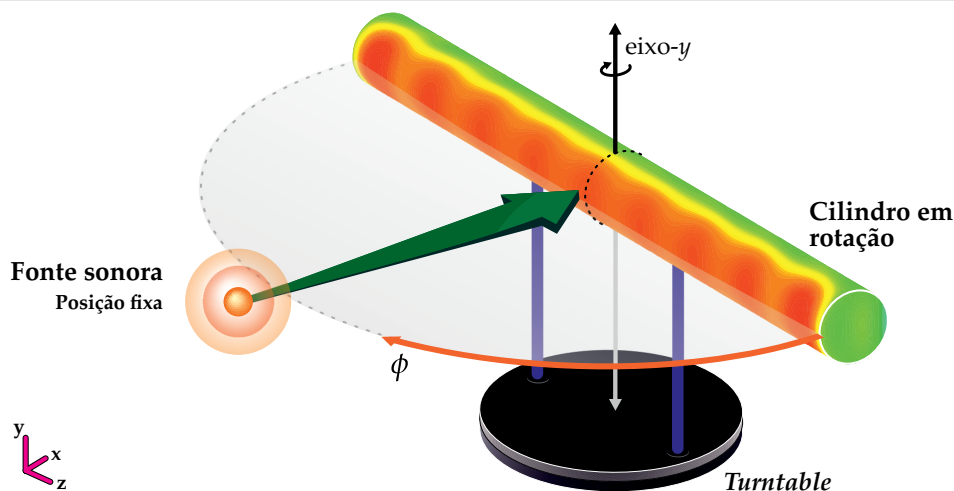


Figura 1: Medição de *beamforming* com arranjo cilíndrico (adaptado de Fonseca [1]).
Exemplo de figura em duas colunas.

sendo que no SI (Sistema Internacional de Unidades) a unidade de densidade é o quilograma por metro cúbico (kg/m^3).

No texto, quando for necessário citar uma equação já apresentada, pode-se fazê-lo da seguinte forma: Equação (3) — com apenas a primeira letra em maiúsculo e com o número correspondente.

2.7 Figuras, tabelas, quadros e códigos

As figuras e tabelas devem ser inseridas durante o texto, preferencialmente em seguida aos parágrafos a que se referem. Uma menção às figuras, tabelas, quadros e códigos no texto corrido, antes da sua apresentação, é necessária para a orientação do leitor. As figuras, tabelas e quadros devem conter todos os elementos de formatação e de conteúdo para que sejam interpretados corretamente, sem necessidade de se recorrer ao texto corrido para uma busca de informações adicionais. Deve-se separar do texto as tabelas e figuras com **1 linha** antes e depois (12 pt).

As figuras, tabelas e quadros deverão ser centralizados e numerados sequencialmente (vide exemplo nas Figuras 1 e 2; Tabela 1; Quadro 1 e Código 1). Elas poderão ser colocadas em uma ou duas colunas dependendo de seu conteúdo (veja também os exemplos das Figuras 3 e 4). No caso de duas colunas, recomenda-se o posicionamento no topo ou na parte inferior da página. Busque utilizar figuras e gráficos em que seu conteúdo possa ser completamente compreendido.

O rótulo e número das figuras, seguido da legenda, deve aparecer logo abaixo e centralizado (10 pt). Caso utilize figuras de outros autores (ou fontes), mesmo que adaptadas, indique a fonte logo após a legenda descritiva, vide exemplo da Figura 1.

O rótulo, número e legenda das tabelas (quadros e códigos também) devem aparecer centralizados na parte superior (vide Tabela 1). A fonte (quando necessário) das tabelas deve ser apresentada de acordo com a publicação original. A Tabela 1 apresenta um exemplo do estilo a

Tabela 1: Propriedades microgeométricas e macroscópicas das camadas porosas CPA 1 e CAUQ-B [2].
Exemplo de tabela em duas colunas.

| Amostra / Parâmetro | L_p [μm] | L_a [μm] | D_p [μm] | D_a [μm] | σ [Ns/m^4] | ϕ [—] | α_∞ [—] |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------|
| CPA 1 - 3% | 1359,81 | 1492,51 | 2344,05 | 1425,67 | 5131 | 0,218 | 1,63 |
| CAUQ-B - 4,5% | 1598,29 | 701,24 | 2126,46 | 895,34 | 54989 | 0,070 | 2,89 |

ser utilizado (o conteúdo da tabela poderá conter tipografia menor que a do texto). Ademais, recomenda-se fortemente o sistema de referências cruzadas automatizado. Lembre-se que todos os objetos, como figuras e tabelas, devem ser citados no texto.

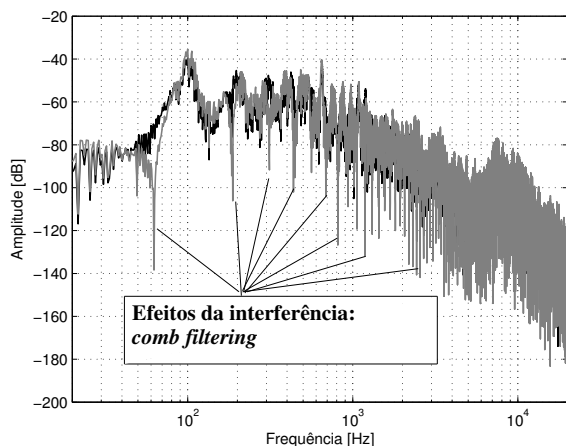
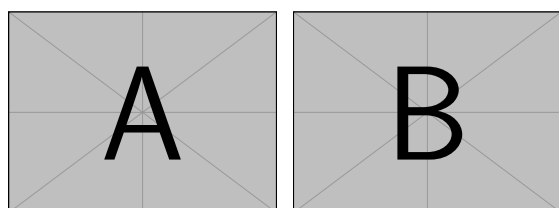


Figura 2: C_{80} para salas distintas. As figuras podem ser colocadas lado a lado (retirado de Brandão [3]).



(a) Figura A

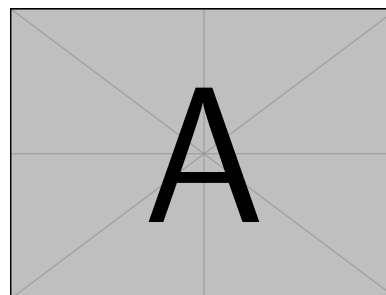
(b) Figura B

Figura 3: Exemplo de figuras lado a lado.

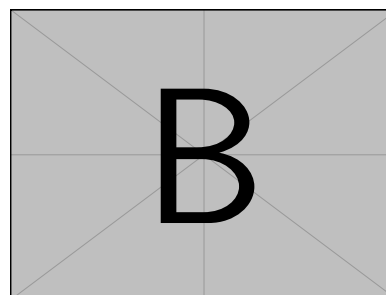
Quadro 1: Este é um exemplo de um quadro.

| Experimento / Tipo | Exp. 1 | Exp. 2 |
|--------------------|--------|---------|
| Tipo 1 | Verde | Amarela |
| Tipo 2 | Azul | Branco |

Recomenda-se que gráficos, figuras, fotos e qualquer arquivo gráfico, estejam inseridos no texto em formato .jpg e/ou .png com boa qualidade (ou ainda em formato vetorial em .pdf para usuários do \LaTeX). Atente para que os elementos de gráficos e figuras sejam legíveis (sobretudo se a informação for pertinente).



(a) Figura A



(b) Figura B

Figura 4: Exemplo de figuras (a) e (b) empilhadas.

A distribuição deste *template* de \LaTeX inclui o pacote `Codes2Latex.sty`³, que habilita possibilidades para documentação de códigos genéricos e nas linguagens Matlab, Fortran, Python, LabView e Latex de forma organizada (observe o Código 1).

Código 1: Fazendo o Matlab escrever Latex.

```
syms x
f = taylor(log(1+x));
latex(f)
```

Todos os elementos podem ser coloridos ou em tons de cinza. Evite a utilização de elementos textuais de outros autores sem a devida citação (e/ou autorização). É essencial que as figuras que apresentarem texto estejam na mesma língua do artigo. Não serão aceitas citações indiretas como *Google imagens*, por exemplo, assim como recomenda-se evitar o uso de bases de conhecimento voláteis como o Wikipedia.

As referências cruzadas devem ser feitas para todos os elementos, por exemplo: Figura 1 e Tabela 1 (apenas a primeira letra maiúscula). Caso exista uma subfigura, use Figura 1 (a), por exemplo.

³Para mais detalhes consulte o arquivo `sty`.

3. TIPOS DE ARTIGO

A revista aceitará **submissões originais** (isto é, ainda não publicadas) de pesquisas científicas e aplicações de engenharia, arquitetura, áudio, física, matemática e áreas afins. Assim, serão considerados os seguintes tipos de documento:

- **Artigos de revisão** (*Review papers*): discutem o *estado da arte* sobre o tema pretendido, aclarando desde aspectos básicos até os sofisticados. Esse tipo de submissão deve ser completo no que concerne à literatura, cobrindo em boa parte as ideias, modelos, experimentos etc. já desenvolvidos, mesmo que não estejam de acordo com a opinião do autor. É importante que o assunto seja de interesse da comunidade científica.
- **Artigos científicos** (*Scientific papers*): contém material original (ideias, modelos, experimentos etc.) não publicado, que contribui substancialmente para o avanço da ciência naquele tema. Ele deve estabelecer uma relação entre seu conteúdo e o *estado da arte* já publicado.
- **Artigos técnicos e aplicados** (*Technical and applied papers*): apresentam material original a partir de aplicações de técnicas conhecidas e/ou em desenvolvimento. Deve apresentar métodos aplicados que estejam de acordo com normativas e/ou que apresentem resultados pertinentes. É essencial que sejam de interesse de pesquisadores e profissionais do tema proposto.

Algumas sugestões de áreas para publicação são:

- Acústica geral;
- Acústica não-linear;
- Processamento de sinais;
- Acústica virtual e auralização;
- Imageamento acústico (*beamforming*, intensimetria, holografia);
- Acústica ambiental;
- Acústica arquitetônica: condicionamento;
- Acústica de edificações: isolamento;
- Acústica fisiológica (psicoacústica), subjetiva, fonoaudiologia e saúde;

- Métodos numéricos em acústica, vibrações e áudio;
- Acústica subaquática e geofísica;
- Processamento e síntese de fala;
- Vibrações e vibroacústica;
- Acústica musical e instrumentos musicais;
- Circuitos e dispositivos para acústica, vibrações e áudio;
- Acústica veicular e da mobilidade (automotiva, aeronáutica, ferroviária etc.);
- Aeroacústica;
- Bioacústica;
- Controle de ruído;
- Acústica industrial;
- Áudio e eletroacústica;
- Instrumentação e metrologia;
- História da acústica;
- Legislação, ética e normas;
- Ensino em acústica, vibrações e áudio;
- entre outros.

4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura do artigo deverá contemplar pelo menos os seguintes itens:

- **Introdução:** visão geral sobre o assunto com definição dos objetivos do trabalho, indicando a sua relevância.
- **Fundamentos:** sobretudo em artigos científicos, a fundamentação teórica principal necessária ao entendimento do texto deve ser apresentada e referenciada;
- **Desenvolvimento:** como o trabalho foi realizado, incluindo detalhes de teoria, materiais e métodos empregados;
- **Resultados e discussões:** parciais ou conclusivos, conforme a modalidade do trabalho, fazendo referência a medições e cálculos estatísticos aplicados, se for o caso;
- **Conclusões ou Considerações finais:** basear-se nas discussões e objetivos, apresentando apontamentos e considerações que findam o estudo/aplicação;
- **Agradecimentos:** opcional, quando for pertinente;

- Referências: apresentar bibliografia citada no texto.

Não necessariamente existindo seções com estes nomes. A organização é também dependente do tipo do artigo. Outros elementos pós-textuais como apêndices são opcionais, desde que eles (no total) não excedam o limite de duas páginas.

4.1 Citações e referências

Para a confecção das referências deve-se utilizar a norma brasileira vigente (ABNT). As referências devem ser numeradas conforme ordem de aparição, utilizando colchetes [4] (conforme a norma brasileira permite). Todas referências devem ser citadas durante o texto. As referências [1–9] deste modelo de artigo são apenas ilustrativas (para efeito de compreensão).

Ao final do documento a seção de referências deve ser colocada. As entradas nela contidas devem ter tipografia com tamanho 10 pt, espaçamento simples e espaçamento de parágrafo de 8 pt. Este *template* de L^AT_EX usa o pacote *abntex2cite* que as coloca no formato correto. Recomenda-se a utilização de gerenciadores de banco de dados de bibliografia como o [JabRef](#), [Mendeley](#) e [Zotero](#). Em especial para usuários do Word, o Mendeley tem um *plugin* para formatar e inserir as referências no documento .docx.

Dependendo do contexto, o nome do autor pode ou não ser escrito, conforme os exemplos a seguir:

- “... Mareze et al. [7] trabalharam com absorção de materiais porosos...” ou
- “... para o estudo de acústica de salas [3] recomenda-se a leitura de um livro texto...” ou
- “... aplicando a Transformada de Fourier nos sinais de entrada [5]. ” ou ainda
- “... Fonseca (2013) demonstrou o cálculo de difração para superfícies cilíndricas [1].”

Todos os autores que constam nas referências devem estar citados no texto.

Em referências com até três autores, por exemplo, Müller e Massarani [6], ambos devem ser citados (quando evocados). No caso de mais de três autores, por exemplo, Gomes et al. [4] deve-se citar somente o último nome do primeiro autor seguido da expressão “et al.”. Ainda, ao citar mais de uma referência, utilize apenas um colchete, veja alguns exemplos a seguir:

- “Trabalhos em temas de acústica e vibrações [1–3].”
- “Trabalhos em temas de acústica e vibrações [1, 2, 3].”
- “Trabalhos em temas de acústica [2, 5–7].”
- “Trabalhos com análise estatística [2, 3, 8].”
- **Não usar esse estilo** “Trabalhos com análise estatística [2], [3], [9].”

Recomenda-se que a referências sejam ordenadas e compactadas (com travessão) como em [2, 5–7].

Na seção de referências, sempre que possível, inclua o ISBN, ISSN, DOI⁴ (com link) e/ou link com a direção online em que o documento citado está disponível.

5. SUBMISSÃO E AVALIAÇÃO

É responsabilidade dos autores a preparação e envio dos artigos em seu formato final. Por esse motivo, pede-se que verifiquem com atenção a formatação de seus artigos, especialmente gráficos e fotos, quanto à legibilidade e qualidade digital (e para impressão). Os artigos deverão ser enviados (submetidos) nos formatos descrito a seguir.

Para usuários do **Word**:

- .docx e .pdf com identificações;
- .docx e .pdf **sem identificações de autores e filiações.**

⁴Para usuários de Latex basta usar o campo “doi” de seu .bib.

Para usuários do \LaTeX :

- .rar (contendo todo o projeto) e .pdf com identificações;
- .pdf **sem identificações de autores e filiações**.

O envio dos documentos sem a identificação⁵ é para que o processo de avaliação seja duplo-cego, ou seja, avaliadores desconhecem os autores e autores desconhecem os avaliadores. Desse modo, busca-se uma avaliação/revisão justa e técnica. Caso seja necessário, oculte nomes e filiações (troque por “A”, por exemplo) que estejam porventura no texto. Todo artigo será avaliado por pelo menos dois profissionais, que emitirão o parecer de *aceitação*, *aceitação mediante revisão* ou *rejeição*.

Pesquisas que envolvam pessoas (ou seres vivos, em geral), como em Acústica subjetiva ou fisiológica, por exemplo, deverão aclarar no artigo o termo de aprovação do Comitê de Ética. Ademais, na oportunidade da submissão, o PDF do instrumento (ou procedimento) de avaliação deve ser submetido junto à cópia digital do documento de aprovação do Comitê de Ética.

6. MODELOS PARA WORD E \LaTeX

O modelo de \LaTeX (.tex) foi escrito em codificação UTF8, assim é compatível com Windows, Mac, Linux e *Overleaf*⁶. Pode ser usado livremente para a elaboração dos artigos.

O modelo de .docx foi criado em Microsoft Word 2016 e, com isso, suas funcionalidades de espaçamento e configurações são garantidas para essa versão.

O autor deste texto e dos modelos/*templates* é o professor William D'Andrea Fonseca, da Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria.

⁵Verifique se não há identificação nos metadados dos arquivos *sem identificação*.

⁶<https://pt.overleaf.com/read/mnmwhwcsykjh>.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Busca-se, por meio desse artigo modelo, elencar e aclarar as instruções para submissão de artigos para a Revista Acústica e Vibrações. Este próprio documento pode ser usado como modelo apenas trocando, o conteúdo.

Em caso de dúvidas, entre em contato com a comissão editorial.

8. AGRADECIMENTOS

Em caso de trabalhos com fomento, utilize esta seção para elucidar detalhes.

Se for pertinente, faça agradecimentos. No caso deste documento, o autor gostaria de agradecer ao professor Alexandre Teixeira, pelas observações e ajuda com o modelo de Word. Ademais, ao revisor de inglês Joseph Lacey pelas considerações no *abstract*.

REFERÊNCIAS

1. FONSECA, William D'Andrea. *Beamforming considerando difração acústica em superfícies cilíndricas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013. ISBN 978-8591677405. Disponível em: <http://www.bu.ufsc.br/teses/PEMC1445-T.pdf>.
2. MAREZE, Paulo H.; COPETTI, Guilherme; BRANDÃO, Eric; FONSECA, William D'Andrea; DRESCH, Fernanda; SPECHT, Luciano P. Modelagem da absorção acústica de camadas porosas asfálticas. In: *XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Sobrac 2017*. Brasília, DF: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://bit.ly/Modelagem-da-absorcao-acustica-de-camadas-porosas-asfalticas>.
3. BRANDÃO, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
4. GOMES, Márcio H. A.; BONIFACIO, Paulo R. O.; CARVALHO, Mário O. M.; AZIKRI, Hilbeth P. Vibro acoustic method for non destructive test of composite sandwich structu-

res. *Applied Mechanics and Materials*, v. 751, p. 153–158, 2015. ISSN 1662-7482. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.751.153](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.751.153).

5. OPPENHEIM, Alan; WILLSKY, A. Simon. *Sinais e Sistemas*. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010. ISBN 978-8576055044.

6. MÜLLER, Swen; MASSARANI, Paulo. Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 49, n. 6, p. 443–471, 2001. ISSN 1549-4950. Disponível em: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10189>.

7. MAREZE, Paulo H.; BRANDÃO, Eric; FONSECA, William D'Andrea; SILVA, Olavo M.; LENZI, Arcanjo. Modeling of acoustic porous material absorber using rigid multiple micro-ducts network: Validation of the proposed model. *Journal of Sound and Vibration*, v. 443, p. 376–396, 2019. ISSN 0022-460X. doi: [10.1016/j.jsv.2018.11.036](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.036).

8. BORGES, Joice; PACHECO, Fernanda; TUTIKIAN, Bernardo; OLIVEIRA, Maria Fernanda. An experimental study on the use of waste aggregate for acoustic attenuation: EVA and rice husk composites for impact noise reduction. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 501–508, 2018. ISSN 0950-0618. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.078](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.078).

9. RISTOW, João Paulo; PINSON, Samuel; FONSECA, William D'Andrea; CORDIOLI, Julio. Utilização da integral de kirchhoff-helmholtz para simulação de dados de sonar de múltiplos feixes. *Acústica e Vibrações*, Sociedade Brasileira de Acústica, v. 31, n. 48, p. 5–18, 2016. ISSN 2764-3611, 1983-442X. doi: [10.55753/aev.v31e48.98](https://doi.org/10.55753/aev.v31e48.98).

NOMENCLATURA

Caso o artigo contenha muitas equações e/ou derivações matemáticas, é permitido se adicionar uma seção opcional de nomenclatura ao final (organizada por grupos e em ordem alfabética), como consta neste exemplo.

Em \LaTeX é possível usar o comando `\nomenclature[A]{B}{C}`, em que o argumento A é o grupo, B é a variável e C a sua descrição.

Símbolos gerais

| | |
|-----|---------------------------------|
| A | Área do círculo em m^2 |
| p | Pressão sonora em Pa |
| r | Raio em m |

Símbolos gregos

| | |
|--------|------------------------------|
| ϕ | Ângulo em graus ($^\circ$) |
|--------|------------------------------|

Operadores matemáticos e convenções

| | |
|---|----------------------|
| d | Operador diferencial |
|---|----------------------|

Acrônimos e abreviaturas

| | |
|--------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AIP | American Institute of Physics |
| DOI | <i>Digital Object Identifier</i> |
| HRTF | <i>Head-Related Transfer Function</i> |
| Matlab | Matrix Laboratory |
| ORCID | <i>Open Researcher and Contributor ID</i> |
| PACS | <i>Physics and Astronomy Classification Scheme</i> |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| Sobrac | Sociedade Brasileira de Acústica |
| UTF8 | 8-bit Unicode Transformation Format |

A. COMANDOS ADICIONAIS E EXEMPLOS PARA L^AT_EX

Este é um exemplo de apêndice, geralmente se colocam informações adicionais ou derivações produzidas pelos autores.

Há incluído nesta distribuição uma série de comandos adicionais (e opcionais) dentro do pacote `Will.sty`, desenvolvidos pelo Prof. William D'Andrea Fonseca (Engenharia Acústica - UFSM). Eles facilitarão a escrita em L^AT_EX, alguns deles são mostrados aqui. Todavia, recomenda-se que o pacote seja aberto e lido. Veja neste documento os códigos que geram os exemplos a seguir:

- Temperatura de 30°C.
- Referência cruzada de forma facilitada utilizando o comando `\figura{}`, Figura 1.
- Comandos e.g., i.e., etc., et al.
- Raiz quadrada fechada $\sqrt{1982}$ ou aberta $\sqrt[1982]{}$.
- Texto em pé no ambiente matemático (AB_i), subscripto (T_{Sabine}) ou sobrescrito (C^{asa}).
- Convenções matemáticas, funções e/ou operadores: j, e, exp e d escritas em pé (no modo matemático).
- Vários possíveis modos de escrever vetores \vec{W} \vec{W}_l \vec{W}_L \vec{A} \vec{A}_S \vec{AB} \vec{A} \vec{C} \vec{B}_s \vec{C} .
- \mathfrak{F} de Transformada de Fourier.
- Entre outros...

Os autores podem optar por não usá-los, basta comentar a linha que chama o pacote.

B. ESCRREVENDO UM CÓDIGO DE APÊNDICE EM UMA COLUNA

Caso existam códigos muito extensos, o apêndice pode ser convertido para uma coluna, como exemplificado nesta seção com o Código 2.

Código 2: Exemplo de inclusão de código (de Matlab) em duas colunas.

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % Código para cálculo de fator de crista (FC) e PAPR, além de poder corrigir o FC.
3  % Prof. William D'Andrea Fonseca - Engenharia Acústica UFSM
4  % 26/11/2019
5  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6  %% Cleaning Service
7  clear all; close all; clc
8
9  %% Geração de sinais
10 pk = ita_generate('pinknoise',1,44100,18);
11 wt = ita_generate('whitenoise',1,44100,18);
12
13 %% Carrega sinais e seleciona
14 % mus = 'Metallica'
15 mus = 'pk'
16 % mus = 'wt'
17
18 %%% Calcula Vpk e Vrms
19 Vpk = max(abs(eval(strcat(mus, '.timeData(:,1)'))));
20 Vrms = rms(eval(mus));
21
22 %%% Apresenta valores
23 V = [Vpk, mean(Vrms)]
24
25 %%% Calcula FatC e PAPR
26 FatC = Vpk/mean(Vrms);
27 PAPR = 10*log10((Vpk/mean(Vrms))^2);
28
29 %%% Apresenta valores
30 fc = [FatC, PAPR]
31
32 %% Código experimental para corrigir o fator de crista de sinais
33 x = eval(strcat(mus, '.timeData(:,1)'));
34 Q = 6; Qx = FatC;
35
36 th = 0.1; % Threshold ou limiar
37 Q = 10^(Q/20); % Converte de dB para linear
38 % Processamento
39 while Q/Qx < 10^(-th/20) || Q/Qx > 10^(th/20)
40     x = x/max(abs(x)); % Normalizar o sinal
41     if Q/Qx > 10^(th/20)
42         x = sign(x).*sqrt(sinh(x.^2)); % Aumento
43     else
44         x = sign(x).*sqrt(asinh(x.^2)); % Diminuição
45     end
46     Qx = max(abs(x))/rms(x); % Novo valor de FC
47 end
48 x = x - mean(x); x = x/max(abs(x));
49
50 PAPRx = 10*log10((max(abs(x))/rms(x))^2)
51 musNEW = itaAudio(x,44100,'time');
52 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
53 %% EOF
    
```

Associe-se à



SOBRAC

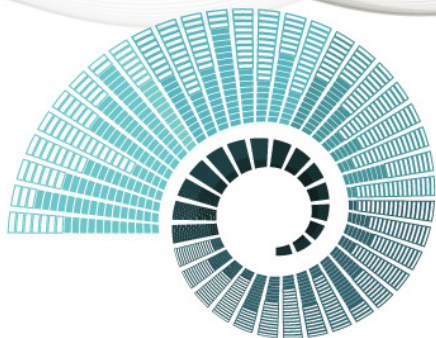
Sociedade Brasileira de Acústica

É fácil

- Acesse o site da Sobrac (acustica.org.br) e, na aba superior, selecione o item "Associe-se", escolhendo em seguida a categoria pretendida (**efetivo**, **estudante** ou **institucional**).
- Preencha o pré-cadastro e submeta-o.
- Sendo os dados aprovados, o sistema lhe comunicará que está à espera do primeiro pagamento, para efetivar a associação à Sobrac.
- O sistema disponibiliza pagamentos através do PagSeguro, via cartão de crédito (podendo ser parcelado) ou boleto bancário.
- Para maiores informações entre em contato.

Os associados têm sempre acesso à Revista Acústica & Vibrações e descontos em eventos da sociedade e parceiras!

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)



FIA 2020

XII CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOBRAC

20 a 23 de setembro de 2020 / Florianópolis-SC

www.fia2020.com.br



Realização



Secretaria executiva



Patrocinador ouro



Patrocinador prata



Ano internacional do som



Patrocinador bronze



Divulgação



MAIS INFORMAÇÕES: +55 48 3028-2004

INFORMAÇÕES DA COMISSÃO

A Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC) tem o prazer de convidá-los para o 12º Congresso Iberoamericano de Acústica, que será realizado em Florianópolis, de 20 a 23 de setembro de 2020. A programação incluirá palestras de especialistas mundialmente renomados, bem como apresentações de trabalhos e pôsteres sobre temas relacionados às áreas de Acústica e Vibrações. Uma exposição técnica com os últimos avanços em produtos e equipamentos e o XXIX Encontro da SOBRAC ocorrerão em paralelo ao Congresso.

O FIA2020 tem como objetivo promover o intercâmbio de experiências de pesquisadores, professores, estudantes e profissionais dos países ibero-americanos que atuam em questões de Acústica, Vibrações e áreas correlatas. Busca-se criar um ambiente de discussão entre as pessoas envolvidas na produção, difusão e aplicação de técnicas e processos nos campos de abrangência.

DATAS PARA OS ARTIGOS

- Início da submissão de resumos: Dezembro 2019
- Prazo para submissão de resumo: até 30/03/2020
- Comunicação de aceite dos resumos: 30/04/2020
- Envio dos trabalhos finais: 30/06/2020
- Prazo para pagamento da inscrição do autor: 30/06/2020

DATAS PARA INSCRIÇÃO

| Categoria | Até 28/05/2020 | Até 30/06/2020 | Até 30/06 e no local |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Profissional sócio FIA * | R\$ 700,00 | R\$ 1.000,00 | R\$ 1.200,00 |
| Profissional não sócio | R\$ 900,00 | R\$ 1.250,00 | R\$ 1.500,00 |
| Estudante sócio FIA * | R\$ 300,00 | R\$ 400,00 | R\$ 500,00 |
| Estudante não sócio | R\$ 400,00 | R\$ 500,00 | R\$ 600,00 |
| Acompanhante | R\$ 150,00 | R\$ 150,00 | R\$ 150,00 |
| Paper adicional | R\$ 150,00 | R\$ 150,00 | R\$ 150,00 |
| Jantar de confraternização | R\$ 130,00 | R\$ 130,00 | R\$ 130,00 |

ÁREAS TEMÁTICAS

Acústica ambiental
Acústica da audição e da fala
Acústica de salas
Acústica de edificações
Acústica musical
Acústica submarina
Acústica veicular
Acústica virtual
Aeroacústica
Áudio e eletroacústica
Bioacústica
Controle de ruído
Ensino em acústica
Equipamentos e medições acústicas
Legislação e normalização em acústica
Materiais acústicos
Métodos numéricos em acústica
Paisagens sonoras
Processamento de sinais
Psicoacústica
Ruído e vibrações em ambiente laboral
Ultrassom
Vibrações e vibroacústica

*Sócios: membros das sociedades que compõem a FIA

Desconto especial para inscrições em grupo, na categoria estudante. Mais informações no site www.fia2020.com.br

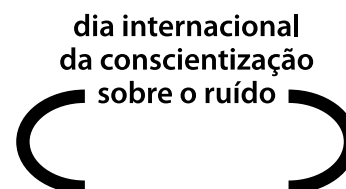
Eventos de acústica pelo Brasil e o mundo

Nesta seção são colocados alguns dos próximos eventos, congressos e encontros de acústica pelo mundo, junto com suas datas, locais e endereços virtuais.

2019

- **Dia Internacional de Conscientização sobre o Ruído (INAD)**
ou *International Noise Awareness Day*

- Data: 24 de abril de 2019
- Local: Mundo todo
- Brasil: <http://inadbrasil.com/inad-2019/>
- Internacional: <https://chchearing.org/noise/day/>



- **177º Meeting Acoust. Soc. America**

- Data: 13-17 de maio de 2019
- Local: Louisville, Kentucky, EUA
- <https://acousticalsociety.org/asa-meetings/>



- **Internoise 2019**

- Data: 16-19 de junho de 2019
- Local: Madrid, Espanha
- <http://www.internoise2019.org/>



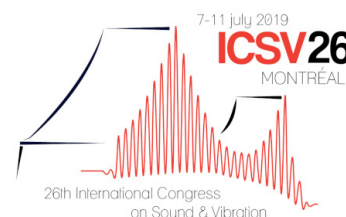
- **Int. Conference on Wind Turbine Noise (WTN2019)**

- Data: 12-14 de junho de 2019
- Local: Lisboa, Portugal
- <https://www.windturbinenoise.eu/content/conferences/8-wind-turbine-noise-2019/>



- **26º Int. Congress on Sound & Vibration (ICSV 26)**

- Data: 7-11 de junho de 2019
- Local: Montreal, Canadá
- <http://www.icsv26.org/>



- **Noise-Con 2019**

- Data: 25-28 de agosto de 2019
- Local: San Diego, Califórnia, EUA
- <https://noisecon19.inceusa.org/>



• **23º International Congress on Acoustics (ICA)**

integrando com 4º EAA Euroregio 2019

- Data: 9-13 de setembro de 2019
- Local: Aachen, Alemanha
- <http://ica2019.org/ea-euroregio-events/>



• **IV Seminário Gaúcho de Acústica e Vibrações (SEGAV)**

- Data: 4 de outubro de 2019
- Local: Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil
- <https://www.ufsm.br/cursos/pos-graduacao/santa-maria/ppgec/2019/10/03/iv-seminario-gaicho-de-acustica-e-vibracoes-iv-segav/>



• **25th International Congress of Mechanical Engineering**

- Data: 20-25 de outubro de 2019
- Local: Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
- <https://eventos.abcm.org.br/cobem2019/about/welcome/>



• **Aachen Acoustics Colloquium 2019 (AAC)**

- Data: 25-27 de novembro de 2019
- Local: Aachen, Alemanha
- <https://www.aachen-acoustics-colloquium.com/>



• **178º Meeting Acoust. Soc. America**

- Data: 2-6 de dezembro de 2019
- Local: San Diego, Califórnia, EUA
- <https://acousticalsociety.org/asa-meetings/>



• **Mat & Flow 2019**

- Data: 2-6 de dezembro de 2019
- Local: Le Mans, França
- <https://matflow2019.sciencesconf.org/>



2020

- **3º Euro-Mediterranean Conference on Structural Dynamics and Vibroacoustics** integrando com AIDAA - Italian Association of Aeronautics and Astronautics

- Data: 17-25 de fevereiro de 2020
- Local: Nápoles, Itália
- <https://medyna2020.sciencesconf.org/>



- **8º Berlin Beamforming Conference (BeBeC)**

- Data: 2-3 de março de 2020
- Local: Berlim, Alemanha
- <http://www.bebec.eu/>



- **46º Congresso da Sociedade Alemã de Acústica (DAGA 2020)**

- Data: 16-19 de março de 2020
- Local: Hanover, Alemanha
- <http://www.daga2020.de/en/>



- **International Conference on Voice Physiology and Biomechanics (ICVPB)**

- Data: 16-20 de março de 2020
- Local: Grenoble, França
- <https://euracoustics.org/events/events-of-2020/icvpb-international-conference-on-voice-physiology-and-biomechanics>

- **Forum Acusticum 2020**

- Data: 20-24 de abril de 2020
- Local: Lion, França
- <https://fa2020.universite-lyon.fr/fa2020/english-version/>



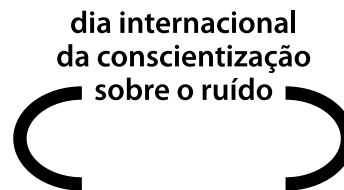
- **International Conference on Sound and Vibration**

- Data: 23-24 de abril de 2020
- Local: Boston, Massachusetts, EUA
- <https://waset.org/sound-and-vibration-conference-in-april-2020-in-boston>



• **Dia Internacional de Conscientização sobre o Ruído (INAD) ou *International Noise Awareness Day***

- Data: 29 de abril de 2020
- Local: Mundo todo
- Brasil: <http://inadbrasil.com/inad-2020/>
- Internacional: <https://chcheating.org/noise/day/>



• **Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2020 (BNAM)**

- Data: 3-6 de maio de 2020
- Local: Oslo, Noruega
- <https://www.bnam2020.org/>



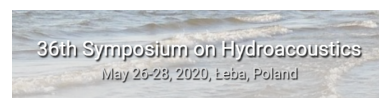
• **179º Meeting Acoust. Soc. America**

- Data: 11-15 de maio de 2020
- Local: Chicago, Illinois, EUA
- <https://acousticalsociety.org/asa-meetings/>



• **36th Symposium on Hydroacoustics**

- Data: 26-28 de maio de 2020
- Local: Leba, Polônia
- <http://sha2020.pl/>



• **Tecniacústica 2020, 51º Congreso Español de Acústica & XI Congreso Ibérico De Acústica**

- Data: 3-5 de junho de 2020
- Local: Faro, Portugal
- <http://www.sea-acustica.es/index.php?id=437>

• **13th ICBEN Congr. on Noise as a Public Health Problem**

- Data: 15-18 de junho de 2020
- Local: Estocolmo, Suécia
- <https://www.icben2020.se/>



• **11th International Styrian Noise, Vibration and Harshness Congress (ISNVH)**

- Data: 17-19 de junho de 2020
- Local: Graz, Áustria
- <https://www.isnvh.at/>



• **Noise-Con 2020**

- Data: 29 de junho a 1 de julho de 2020
- Local: Nova Orleans, Louisiana, EUA
- <https://www.inceusa.org/noisecon20/>



• **International Conference on Underwater Acoustics (ICUA)**

- Data: 6-10 de julho de 2020
- Local: Southampton, UK
- <http://icua2020.org/>



• **Int. Congress on Sound and Vibration (ICSV 27)**

- Data: 12-16 de julho de 2020
- Local: Praga, República Tcheca
- <https://www.icsv27.org/>



• **XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**

- Data: 2-6 de agosto de 2020
- Local: Teresina, Piauí, Brasil
- <https://eventos.abcm.org.br/conem2020/>



• **Internoise 2020**

- Data: 23-26 de agosto de 2020
- Local: Seul, Coreia do Sul
- <http://internoise2020.org/>



• **12º Congresso Iberoamericano de Acústica (FIA) & XXIX Encontro da SOBRAC**

- Data: 20-23 de setembro de 2020
- Local: Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
- <https://fia2020.com.br/>
- Veja encarte detalhado na página 121.



• **180º Meeting Acoust. Soc. America**

- Data: 9-13 de novembro de 2020
- Local: Cancún, México
- <https://acousticalsociety.org/asa-meetings/>



• **Aachen Acoustics Colloquium 2020 (AAC)**

- Data: 23-25 de novembro de 2020
- Local: Aachen, Alemanha
- <https://www.aachen-acoustics-colloquium.com/>



2021

- Dia Internacional de Conscientização sobre o Ruído (INAD): 28/04/2021 (Mundo todo)
- EuroNoise 2021: 21-23/06/2021 (Funchal, Madeira, Portugal)
- ICSV 2021: 25-29/07/2021 (Singapura)
- Internoise 2021: 01-04/08/2021 (Washington, EUA)
- 182º Meeting Acoust. Soc. America: 06-10/12/2021 (Sydney, Austrália)

2022

- Dia Internacional de Conscientização sobre o Ruído (INAD): 27/04/2022 (Mundo todo)
- ICA 2022 - Int. Cong. on Acoustics: 24-28/10/2022 (Gyeongju, Coreia do Sul)
- FIA 2022 - Congresso Iberoamericano de Acustica: 05-07/12/2022 (Santiago, Chile)

Congressos online

- Acompanhe o site do professor António Pedro Oliveira de Carvalho (Universidade do Porto) que há sempre datas atualizadas de congressos
 - <https://web.fe.up.pt/~carvalho/congressos.htm>
- Acompanhe o site da Sociedade Europeia de Acústica (EAA) que há sempre datas atualizadas de congressos
 - <https://euracoustics.org/events/>
- Acompanhe o site da International Commission for Acoustics (ICA) que há sempre datas atualizadas de congressos
 - <https://www.icacommission.org/calendar.html>

Esperamos que o caro leitor possa participar e desfrutar dos eventos da área.

William D'Andrea Fonseca

(Editor A&V)

William D'Andrea
Fonseca 

Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM)

Federal University of
Santa Maria

Av. Roraima n° 1000,
Cidade Universitária
Santa Maria, RS
Brasil

{will.fonseca}
@eac.ufsm.br

Criando a capa comemorativa da Acústica e Vibrações nº50

A edição comemorativa contou com um estudo de cores para a composição da capa

Resumo: Na celebração do marco histórico da 50ª edição, a Revista Acústica e Vibrações apresenta uma capa adicional especial. Nestas páginas, desvela-se o processo criativo e o meticuloso estudo da paleta cromática. Além disso, elabora-se sobre a sobreposição de camadas, engendrando uma ambientação estratégica que conduz os olhares por meio de uma sinfonia entre concepções (das ideias) técnicas e a materialização artística.

Creating the commemorative cover of Acoustics and Vibrations #50

Abstract: In the celebration of the historical milestone of the 50th edition, the Journal of Acoustics and Vibrations presents an exceptional additional cover. Within these pages, the creative process and the meticulous study of the chromatic palette are unveiled. Moreover, an exploration unfolds regarding the layering technique, engineering a strategic ambiance that guides the gaze through a symphony uniting technical concepts and artistic materialization. Section 2 contains the complete text in English.

1. Estudo e concepção

O número 50 é um marco importante na história da Revista Acústica e Vibrações. Com isso, foi decidido junto à diretoria da Sobrac fazer uma capa adicional comemorativa. Este encarte contará um pouco sobre o processo criativo e concepção.

No início, para simbolizar os *temas quentes* da revista, foi feito um estudo de paleta de cores tomando o tom padronizado Pantone 804 C como referência, conforme mostrado na Figura 1.

A partir da escolha de cores, as camadas foram trabalhadas uma a uma, veja a Figura 2. Utilizando a paleta estudada, a primeira delas contém um preenchimento em malha com formas senoidais. Para criar um contraste maior para o título, foram adicionados tons de magenta (em pontilhado na Figura 1), criando uma transição que direciona os olhos do centro ao topo, veja a Figura 2 (a).



Figura 1: Estudo de cores e tons baseado no Pantone 804 C — em pontilhado tons de magenta para contraste. (*Study of colors and tones based on Pantone 804 C — dotted magenta tones for contrast.*)

A ambientação é aprimorada na segunda camada, simbolizando um *universo de conhecimento*. Ela foi criada a partir de uma imagem de uma nebulosa espacial. Após tratamento e aplicação do perfil de cores, ela foi aplicada com *sobreposição de luz suave*, observe a Figura 2 (b).

A terceira camada simboliza o *mergulho no conhecimento*, para obter esse efeito, foi criado um tipo de túnel com luzes, objetivando criar o movimento. A aplicação também é em sobreposição, criando riqueza de detalhes e preservando as outras camadas, observe a Figura 2 (c). Essa versão está ilustrando a contracapa da revista.

Por fim, na capa extra, foi adicionado o número 50 e o cabeçalho da Acústica e Vibrações, veja a Figura 2 (d). Para compor a *capa tradicional*, com a chamada dos artigos, duas películas foram criadas para facilitar a leitura. Todavia, a informação de ISSN foi mantida com o fundo original via recorte.

Sendo uma revista em digital, as cores da capa foram projetadas para funcionar melhor em escala de cores RGB, parecendo *mais vivas* em telas de computador, tablets e/ou celulares. Ao imprimir, haverá ligeira mudança de cores devido à conversão de escala de cores para CMYK.

Você pode encontrar versões em A4, HD, Full HD e 4k para download no material suplementar do link <http://bit.ly/Sobrac-Sup>.

Esperamos que a leitura da edição nº 50 tenha sido proveitosa.

Cordialmente,

William D'Andrea Fonseca

(*Editor-Chefe AeV*)

2. Study and Concept

The milestone of the 50th edition holds significant historical resonance for the Journal of Acoustics and Vibrations. In honor of this, a commemorative additional cover was conceived in collaboration with the Sobrac board. This supplement unveils insights into the creative process and conceptualization.

Initiating with the intent to encapsulate the journal's "hot topics", a meticulous study of the color palette was initiated, with Pantone 804 C as the guiding hue, as depicted in Figure 1.

Subsequent to color selection, the layers were meticulously cultivated, as illustrated in Figure 2. The initial layer, utilizing the palette studied, features a mesh pattern adorned with sinusoidal forms. To enhance the contrast for the title, magenta tones were artfully introduced (depicted in dotted lines in Figure 1), crafting a transition that guides the viewer's gaze from the center to the pinnacle, as showcased in Figure 2 (a).

The ambiance takes root in the second layer, symbolizing a "universe of knowledge". Forging from an image of a cosmic nebula, the layer is meticulously treated and infused with a gentle luminous overlay, as evidenced in Figure 2 (b).

The third layer embodies a "dive into knowledge", accomplished by sculpting a tunnel of lights to evoke motion. Applied with a seamless overlay, it entwines intricate detailing while preserving the essence of the preceding layers, as illustrated in Figure 2 (c). This rendition graces the magazine's back cover.

In the supplemental cover, the number "50" and the header of "Acoustica and Vibrations" are elegantly etched, as showcased in Figure 2 (d). To adorn the traditional cover, featuring article highlights, two

overlays were meticulously designed to enhance readability. However, the ISSN information maintains its original background through delicate cutting.

As a digital publication, the cover colors are tailored for optimal vibrancy on screens, rendering them more vivid on computers, tablets, and smartphones. For print, a slight color variation may arise due to conversion to the CMYK color scale.

Versions in A4, HD, Full HD, and 4K are available for download in the supplementary material available at <http://bit.ly/Sobrac-Sup>.

We hope you enjoyed reading issue 50.

Yours Sincerely,

William D'Andrea Fonseca

(Editor-in-Chief, AeV)



(a) Cores de base com malha senoidal
(Base colors with sinusoidal mesh)



(b) Camada com um *universo de possibilidades*
(Layer with a universe of possibilities)



(c) *Mergulho no conhecimento*
(Diving into knowledge)



(d) Finalização com número e cabeçalho
(Completion with number and header)

Figura 2: Processo de criação da capa comemorativa. (*Process of creating the commemorative cover.*)

Editorial in English

The Editorial Committee of the **Acoustics and Vibrations Journal** (*Acústica e Vibrações*) presents the **Commemorative Edition No. 50** with great delight. This edition introduces several novelties for authors and readers alike, encompassing innovations for the journal and the articles it comprises.

Internationalization is of paramount importance for scientific and technical journals, facilitating broader access to content for a wider audience. In pursuit of internationalization for the AeV, the initial page of each article will serve as the work's identifying preamble. This section will encompass not only the title, names, affiliations, abstract, and keywords but also the newly introduced fields: PACS, — and in English — title, abstract, and keywords.

Distinguished as a new feature on the inaugural page is a distinctive code of identification, the so-called DOI (Digital Object Identifier), rendering each article indexed in an international database, thus enhancing its discoverability on the Internet. This implementation is poised to yield increased accessibility and increased citation of articles.

The templates for composing new articles have undergone a comprehensive update, now providing versions for composition in both LaTeX and MS Word. These templates are accessible in both [Sobrac website](#) and [Overleaf](#). All instructions have been meticulously revised to encompass writing and formatting guidelines, effectively standardizing styles and streamlining submissions in their final article format. From this number onward, bibliographic references are numbered (as allowed by Brazilian standards).

The comprehensive digital journal (in PDF) now features clickable links and bookmarks, considerably enhancing navigation. All articles are presented with a right-page opening layout, consequently leading to the occasional presence of blank pages within the complete edition.

These aforementioned updates have endowed the *Acoustics and Vibrations Journal* with a layout reminiscent of prominent industry counterparts such as the [Journal of the Acoustical Society of America](#) and the [Journal of Sound and Vibration](#).

As we are well aware, the AeV serves as a unifying platform encompassing diverse realms of knowledge. In this issue, we present seven articles meticulously organized to establish thematic connections throughout.

The inaugural article delves into the construction of a cost-effective apparatus for head-tracking utilizing budget-friendly hardware. Subsequently, an article emerges spotlighting the application of artificial neural networks in virtual acoustics, simultaneously engaging HRTFs.

Persisting in the realm of signal processing, the third article presents “Comparative results for Room 10 of Round Robin 4 obtained by the software RAIOS 7”, elucidating scenarios and exhibiting acquired objective parameters. The fourth article explores the use of microphone arrays for in-situ estimation of acoustic impedance, a parameter of notable significance in computational acoustics.

Transitioning into the fifth article, the journal ventures into the domains of architectural systems, introducing “The acoustic performance of walls: influence of ceramic blocks filling with expanded vermiculite” for walls, incorporating experimental aspects and pertinent results.

The sixth article bridges the gap between architecture and virtual models for simulation, delving into geometric intricacies and simulation outcomes. Finally, the last article (but not least) introduces “Noise

mapping as a diagnostic and design tool”, spotlighting regulatory facets and scrutinizing outcomes.

Following the technical articles, supplementary content graces the conclusion of this edition. The first among these is the model article titled “Instructions and article template for Acoustics and Vibration Journal (2018–2021)”, which serves as a guide for prospective authors.

Successively, a series of notices follow, including an invitation to join Sobrac (providing information for newcomers seeking affiliation), a special call for the 12th Iberoamerican Acoustics Congress – FIA 2020, in conjunction with the 29th Sobrac Meeting (scheduled in Florianópolis, SC, Brazil), and a dedicated section showcasing the “Acoustics events around Brazil and the world”, detailing dates, venues, and websites. Also, a brief description of the process of creating the commemorative cover of this edition is placed in the final insert. Finally, the issue closes with the English-language editorial.

An indispensable expression of gratitude is extended to the Sobrac Board of Directors for the invitation, as well as to the authors and the reviewers, whose dedicated and commendable efforts have been instrumental in realizing this publication.

Cordially,

Prof. Dr. William D’Andrea Fonseca

(AeV Editor-in-Chief)

