



Cabeça artificial binaural em 3D: uma experiência sensorial imersiva

3D binaural artificial head: an immersive sensory experience

Eliabe Bento de Almeida¹, Rodrigo Scoczynski Ribeiro²

RESUMO

A cabeça artificial binaural em 3D, inicialmente desenvolvida por pesquisadores do Trinity College da Irlanda, em 2021, foi adaptada para atender as necessidades de pesquisa na Universidade Tecnológica Federal do Paraná voltadas para análises de medições acústicas. Possui canais auditivos projetados para a instalação de microfones específicos. A impressão 3D utilizou materiais flexíveis nas orelhas, permitindo simulações com diversos dispositivos. Seu propósito principal é investigar a propagação sonora em ambientes variados, como salas de aula, teatros e hospitais. Medições realizadas no teatro municipal de Guarapuava geraram áudios únicos obtidos por meio do método de resposta ao impulso binaural, e a partir de uma convolução de sinal no software MatLab com um áudio aleatório é possível proporcionar uma experiência sensorial imersiva no teatro para qualquer ouvinte sem necessitar a presença ao local. Os resultados contribuem para estudos de resposta ao impulso binaural, análises de ambientes acústicos, pesquisas em fonoaudiologia, testes de inteligibilidade de fala, criação de áudios artificiais e pesquisa em engenharia acústica. Este trabalho promove uma compreensão mais profunda da acústica em diferentes contextos, potencialmente melhorando a qualidade da experiência auditiva em ambientes diversos.

PALAVRAS-CHAVE: Ambientes variados; cabeça 3D; convolução de sinal; resposta ao impulso binaural.

ABSTRACT

The 3D binaural artificial head, initially developed by researchers at Trinity College, Ireland, in 2021, has adapted to meet the research needs at the Federal Technological University of Paraná, focusing on acoustic measurement analysis. It features auditory channels designed for the installation of specific microphones. 3D printing used flexible materials for the ears, enabling simulations with various devices. Its primary purpose is to investigate sound propagation in diverse environments, such as classrooms, theaters, and hospitals. Measurements conducted at the municipal theater of Guarapuava generated unique audio recordings obtained through the binaural impulse response method. By convolving the audio signal with random stimuli using MatLab software, it becomes possible to provide an immersive sensory experience in the theater for any listener without requiring their physical presence at the location. The results contribute to binaural impulse response studies, acoustic environment analysis, research in speech audiology, speech intelligibility tests, artificial audio creation, and acoustic engineering research. This work promotes a deeper understanding of acoustics in different contexts, potentially enhancing the quality of auditory experiences in various environments.

KEYWORDS: Varied environments; 3D head; signal convolution; binaural impulse response.

INTRODUÇÃO

A pesquisa em áudio espacial e processamento de som, com base nos estudos de Peisheng, Fang, Jian e Guofeng (2015), avançou significativamente na criação de experiências sensoriais imersivas por meio da modelagem de audição tridimensional. O foco principal é desenvolver modelos que reproduzam com precisão a capacidade humana de perceber fontes sonoras em ambientes tridimensionais. Recentemente, avanços na fabricação de cabeças modeladas em 3D (HUGENG; WAHIDIN; DADANG, 2010), promovem economia e atendem às necessidades de pesquisas.

¹Bolsista PROPPG UTFPR – PIBIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail: eliabealmeida@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6881085584272783.

²Docente no Curso/Departamento/Programa. Nome da Instituição por Extenso, Município, Estado, País. E-mail: rodrigossribeiro@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8671068553115730.



A Resposta ao Impulso Binaural (RIB), elucidado por FARINA (2000), desempenha um papel essencial na compreensão da percepção auditiva, permitindo a personalização para uma experiência imersiva precisa. Este projeto de pesquisa visa tornar a personalização da RIB mais acessível por meio da impressão 3D, (DARAGH; JOHN, 2020). A aplicação da RIB personalizada e técnicas avançadas de processamento de áudio, a partir de resultados obtidos, abre perspectivas desde a realidade virtual até a pesquisa em acústica, promovendo avanços notáveis na área.

MATERIAIS E MÉTODOS

MODELAGEM E MEDIDAS ANATÔMICAS

O propósito da geração de um modelo anatômico da cabeça humana, considerando estritamente parâmetros antropométricos, seguiu o modelo estabelecido por Hugeng et al. A Tabela 1 elenca as medidas médias correspondente as dimensões masculinas e femininas, derivadas de diferentes amostras populacionais, e serviu como ponto de referência orientativo para iniciativas subsequentes, especialmente na eventualidade de se dispor de dados antropométricos alternativos.

Tabela 1 – Modelo anatômico da cabeça

Parâmetros	Dimensões (mm)
Comprimento da cabeça	193,71
Largura da cabeça	149,71
Largura do pescoço	111,50
Altura do canal auditivo	17,05
Largura da concha	15,88
Comprimento da orelha	59,45
Largura da Orelha	30,88

Fonte: Hugeng et al. (2010)

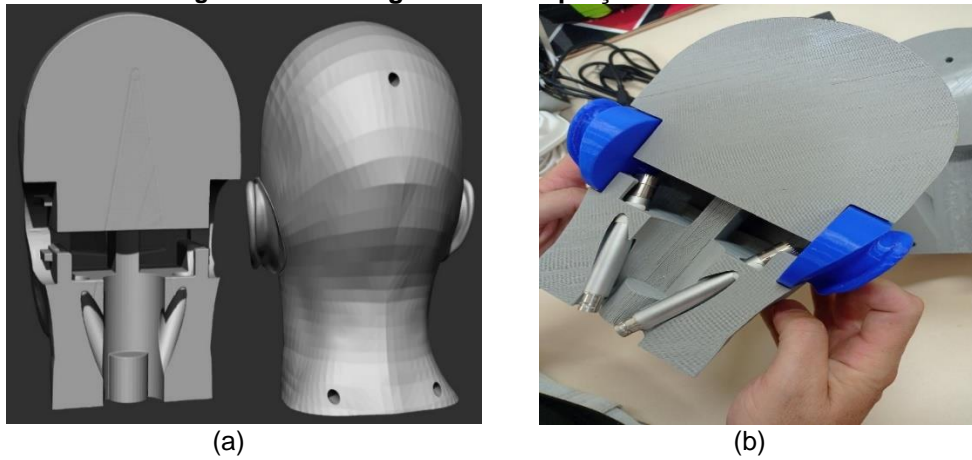
Em virtude das circunstâncias inerentes ao contexto de condição da pesquisa, os canais auditivos foram configurados e remodelados no software Blender com as especificações geométricas do microfone de incidência de campo livre Brüel&Kjær, modelo Unit Type 4966-H-041, conforme mostra a Figura 1.a e 1.b, uma escolha cuidadosamente calibrada para atender aos requisitos técnicos específicos do estudo.

PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Utilizando uma impressora 3D Cloner ST G3, que possui um volume de impressão de 320 mm x 320 mm x 420 mm, suficiente para a produção das dimensões da cabeça. O modelo anatômico foi criado com base nos parâmetros antropométricos especificados, garantindo sua adequação aos objetivos da pesquisa.



Figura 1 – Modelagem com adaptação e microfones



(a)
Fonte: Autoria própria (2023)

(b)

A cabeça foi impressa em PLA (ácido polilático), um material amplamente utilizado na impressora 3D para peças não extensíveis que não requerem altas temperaturas ou tensões. Já as orelhas foram confeccionadas com TPU (poliuretano termoplástico), conhecido por sua flexibilidade e resistência. A Tabela 2 apresenta a quantidade de material utilizado em cada etapa de impressão, bem como o tempo de duração de cada uma delas.

Tabela 2 – Etapas de impressão

Parâmetros	Duração (h)	Quantidade (g)
Cabeça parte frontal	64h15m	850
Cabeça parte inferior	39h50m	480
Orelha direita	5h13m	30
Orelha esquerda	5h13m	30

Fonte: Autoria própria (2023)

Essa abordagem de impressão proporcionou vantagens econômicas significativas em comparação com a aquisição de um modelo anatômico convencional, que pode chegar a custar 200 mil reais, se tornando inviável para o cenário de pesquisa atual. A Figura 2.a, mostra o resultado obtido da impressão.

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO

Para realização da medição foram utilizados: dois microfones de incidência de campo livre Unit Type 4966-H-041 – Brüel&Kjær (dentro da cabeça), duas fontes de alimentação CCP Type 1704-A-001 – Brüel&Kjær, uma placa de som AudioBox USB 97 – PreSonus, 1 notebook Dell Inspiron, um tripé com adaptador para cabeça, uma mesa de som Behringer X32 e o sistema de som do teatro municipal, conforme mostrados nas Figura 2.b.



Figura 2 – Cabeça artificial binaural 3D e equipamentos utilizados durante as medições



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

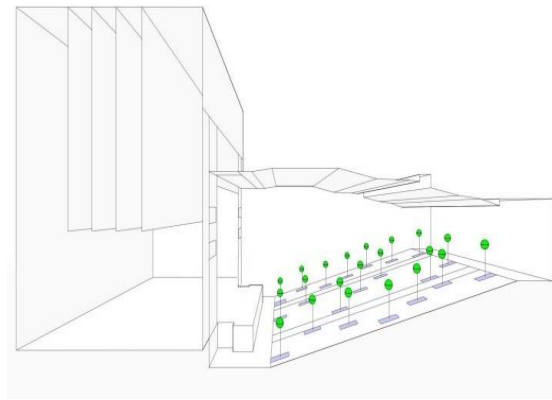
MAPEAMENTO DOS PONTOS NO TEATRO

Para conduzir a pesquisa a cabeça anatômica foi levada ao teatro municipal de Guarapuava como mostra a Figura 3.a, onde os experimentos de áudio espacial e imersão sonora foram feitos. Para capturar com precisão as características acústicas desse espaço, empregou-se uma técnica conhecida como resposta ao impulso binaural, que é um método utilizado como sistema de medição, consistindo em reproduzir um estímulo sonoro específico no ambiente, geralmente um sinal de impulso, e registrar a resposta da cabeça aos sons refletidos no espaço, conforme a NBR ISO 3382-1 (2017). Isso é feito com o uso de microfones posicionados nos ouvidos da cabeça, replicando assim a audição humana em um ambiente tridimensional.

Figura 3 – Medições e posições de resposta ao impulso binaural



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

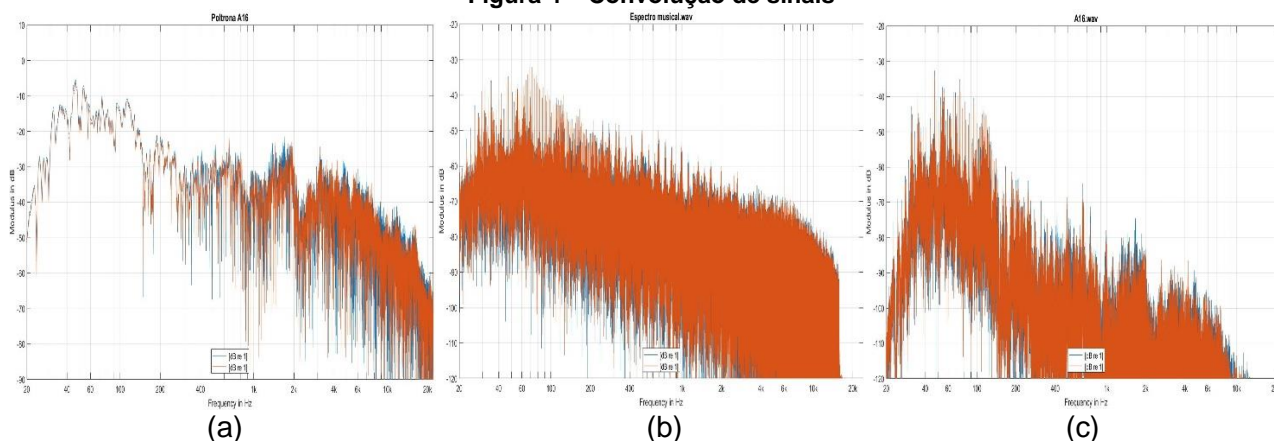
Os resultados obtidos por meio dessa técnica permitiram mapear de maneira precisa e detalhada o ambiente acústico do teatro. Isso incluiu a identificação das características sonoras do teatro, como reverberação, reflexo e distribuição espacial do som. Além disso,



os pontos de referência foram aleatoriamente posicionados nas poltronas do teatro, como mostra a Figura 3.b, permitindo uma experiência sensorial imersiva em múltiplas localizações.

A utilização das respostas ao impulso geradas pela ITA-Toolbox, documentado por Berzborn et al., 2017, possibilitaram a convolução de sinais sonoros pelo software MatLab, permitindo combinar sons previamente absorvidos pela cabeça, Figura 4.a, com um áudio aleatório selecionado, Figura 4.b. O resultado dessa combinação foi a criação de um áudio único, Figura 4.c, que, quando reproduzido através de um sistema de som convencional, proporciona uma experiência auditiva imersiva no teatro. A experiência pode ser apreciada pelos ouvintes em todas as poltronas analisadas, sem a necessidade de estar fisicamente presente no local. Os áudios combinados e a música escolhida estão disponíveis na seção de disponibilidade de código.

Figura 4 – Convolução de sinais



Fonte: Autoria própria (2023)

CONCLUSÕES

Esse estudo demonstrou a aplicabilidade e versatilidade da cabeça impressa em 3D no contexto de pesquisa em áudio espacial e acústica. A utilização da cabeça em um ambiente teatral, empregando a técnica de convolução de sinal através do software MatLab, possibilitou uma análise precisa da qualidade acústica do espaço, bem como a simulação realista da percepção auditiva de um som específico dentro desse ambiente.

Além disso, a economia substancial alcançada ao optar pela fabricação da cabeça em 3D em vez da aquisição de um modelo convencional enfatiza a viabilidade econômica desse método de pesquisa. As amplas possibilidades de aplicação, que incluem análises de ambientes acústicos, pesquisas na área de fonoaudiologia, testes de inteligibilidade de fala, criação de áudios artificiais e estudos em engenharia acústica, destacam o potencial abrangente dessa abordagem.

Este estudo representa apenas uma das muitas aplicações possíveis desse projeto, que atualmente se dedica a pesquisas adicionais, como a validação por meio de uma câmera anecóica e a investigação da inteligibilidade da fala em salas de aula.

Material suplementar

O STL gerado para impressão com as características mencionadas bem como a modelagem 3D podem ser baixados através do link:



<https://drive.google.com/drive/folders/1p2E7zKqA77V-6LXVRK4PK8JquL1ZliMd?usp=sharing>

Agradecimentos

Agradeço a UTFPR-GP por proporcionar a realização da iniciação científica, ao meu orientador Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro por todo o ensinamento e experiência, e ao celeiro de inovações de Guarapuava Cilla Tech Park, pelo apoio na impressão da cabeça.

Disponibilidade de código

O código de convolução criado feito no MatLab assim como áudio gerados em posições aleatórias podem ser acessados e baixados através do link: https://drive.google.com/drive/folders/1tDx_dzUIG1NHtxxoarF0agtVhJYsom_D?usp=sharing

Conflito de interesse

Não há conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR ISO 3382-1**: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 1: Salas de espetáculos. Rio de Janeiro, 2017.

B ARRETO, S. DOS S.; ORTIZ, K. Z. Medidas de inteligibilidade nos distúrbios da fala: revisão crítica da literatura. **Pró-Fono Revista de Atualização científica**, v.20, n.3, p. 201-206, set. 2008.

B ERZBORN, M. et al. **The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ita-toolbox.org/publications/ITA-Toolbox_paper2017.pdf>.

F ARINA, A. **Medição Simultânea de Resposta ao Impulso e Distorção com Técnica de Varredura Sensorial**. Disponível em: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10211>>.

HUGENG; WAHA,W.; GUNAWAN, D. Improved Method for Individualization of Head-Related Transfer Functions on Horizontal Plane Using Reduced Number of Anthropometric Measurements. **Journal of Telecommunications**, v.2. Issue 2. may 2010.

O'CONNOR, D.; KENNEDY. J. An evaluation of 3D printing for the manufacture of a binaural recording device. **Applied Acoustics**, v. 171, p.107610. jan.2021.

ZHU, P.; MO,F.; KANG,J.; ZHU,G. Comparisons between simulated and in-situ measured speech intelligibility based on (binaural) room impulse responses. **Applied Acoustics**, v.97, p.65-77, out. 2015.