

PLATAFORMA DE NEUROACÚSTICA COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE BATIDAS BINAURAIS E MONAURAIS COM POTENCIAL TERAPÊUTICO

Otávio Augusto Corrêa Queiróz Mendonça¹, João Paulo Aparecido Porfírio da Silva²,
Me. Charles Way Hun Fung³, Me. Ederson Cichaczewski⁴

¹ Discente de Engenharia Biomédica, Dourados, Brasil (otavioakazo@gmail.com)

² Discente de Engenharia Biomédica, Curitiba, Brasil

³ Docente de Engenharia Biomédica, Curitiba, Brasil

⁴ Docente de Engenharia Biomédica, Curitiba, Brasil

Resumo: A estimulação auditiva por batidas binaurais e monaurais tem atraído interesse científico devido ao potencial de influenciar estados cognitivos, emocionais e fisiológicos. Entretanto, a falta de ferramentas abertas e validadas limita avanços metodológicos na área. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um software em Python para geração parametrizável dessas batidas, com interface gráfica, análise por FFT, exportação de áudio, temporizador e validação dos sinais gerados.

Palavras-chave: batidas binaurais; batidas monaurais; estimulação auditiva; brainwave entrainment; software biomédico.

INTRODUÇÃO

A estimulação auditiva terapêutica é um campo de crescente interesse na interface entre Neurociência, Engenharia Biomédica e Saúde. Dentre os fenômenos investigados, destacam-se as batidas binaurais (BB) e as batidas monaurais (BM), cujos efeitos sobre estados cognitivos, emocionais e de atenção tem sido objeto de revisões sistemáticas e meta-análises nas últimas décadas (Huang e Charyton, 2008; Argibay et al., 2019).

As batidas binaurais são geradas quando dois tons senoidais de frequências ligeiramente diferentes são apresentados separadamente a cada ouvido. O encéfalo processa a diferença entre essas frequências, percebendo um terceiro tom, a batida binaural, cujo valor corresponde a subtração entre as duas frequências-portadoras. As batidas monaurais, por sua vez, são produzidas pela superposição acústica de dois tons em um único canal, resultando em uma interferência fisicamente mensurável, sem necessidade de processamento cerebral binaural (Oster, 1973).

O fenômeno de sincronização das ondas cerebrais ao estímulo externo é denominado *brainwave entrainment*, ou harmonização cerebral, constitui o mecanismo central pelo qual ambos os tipos de batida exercem seus efeitos. Meta-análises recentes destes sinais indicam efeito global médio significativo ($g = 0,45$) sobre memória, atenção, ansiedade e percepção de dor (Argibay et al., 2019),

o que reforça o interesse clínico e experimental nessas tecnologias.

Apesar desse potencial, observa-se na literatura uma marcante heterogeneidade metodológica entre os estudos, frequentemente decorrente da ausência de ferramentas padronizadas para geração e análise dos estímulos (Huang e Charyton, 2008; Kanzler et al., 2021). O presente trabalho preenche essa lacuna por meio do desenvolvimento de um software integrado e parametrizável, voltado à produção controlada de batidas binaurais e monaurais, com recursos de análise espectral, exportação de áudio e interface gráfica acessível ao pesquisador.

O objetivo geral deste trabalho é descrever o desenvolvimento de um software para geração e análise de batidas binaurais e monaurais, destinado ao uso em pesquisas de estimulação auditiva terapêutica. Como objetivos específicos, destacam-se: (i) implementar algoritmos de síntese de batidas binaurais e monaurais com parâmetros configurados pelo usuário; (ii) integrar módulo de análise espectral por FFT (Transformada Rápida de Fourier) para validação dos sinais gerados; (iii) desenvolver interface gráfica intuitiva para operação do sistema; e (iv) disponibilizar o software como ferramenta de pesquisa reprodutível.

MATERIAL E MÉTODOS

O software foi desenvolvido integralmente na linguagem Python, escolhida por sua ampla adoção

em computação científica. As principais dependências utilizadas foram NumPy para manipulação de arrays e síntese numérica dos sinais e SciPy para o processamento e análise espectral via FFT.

O sistema foi estruturado em módulos funcionais independentes, integrados por uma interface gráfica central. A arquitetura modular permite a manutenção e expansão independente de cada componente, favorecendo a reprodutibilidade experimental.

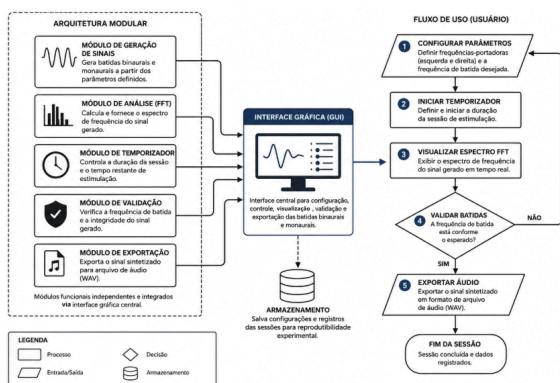


Figura 1. Infográfico referente ao desenvolvimento do software.

A geração das batidas binaurais baseia-se na apresentação simultânea de dois tons senoidais de frequências distintas (f_1 e f_2) em canais auditivos separados. A frequência de batida percebida pelo sistema auditivo central corresponde à diferença

$$Df = |f_1 - f_2| \quad (1)$$

Os sinais são sintetizados numericamente conforme a equação

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (2)$$

onde,

A representa a amplitude; f a frequência do tom portador em cada canal e t o vetor temporal amostrado a taxa de amostragem configurada.

O usuário pode definir as frequências-portadoras, a frequência de batida desejada, a amplitude e a duração da sessão.

As batidas monaurais são produzidas pela superposição aritmética de dois tons de frequências distintas em um único canal de áudio. Diferentemente das batidas binaurais, a interferência entre os tons ocorre de forma física e acústica, sendo detectável instrumentalmente por análise espectral sem necessidade de headphone. O sinal resultante apresenta modulação de amplitude a frequência da equação (1).

A validação dos sinais gerados é realizada internamente pelo software por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), implementada com o módulo `scipy.fft`. A análise espectral permite verificar a presença das frequências-portadoras, a frequência de batida resultante e a ausência de distorções harmônicas indesejadas. Os resultados são exibidos graficamente na interface, possibilitando a inspeção visual imediata pelo usuário.

A interface gráfica foi desenvolvida em Python, utilizando um conjunto de bibliotecas de uso direto e dependências transitivas. As bibliotecas utilizadas diretamente foram: NumPy (v. 2.4.4), responsável pela geração vetorizada das amostras das senóides dos canais esquerdo e direito e pelo cálculo do sinal binaural resultante; SciPy, empregada no processamento de sinais, incluindo a Transformada Rápida de Fourier (FFT), janelamento espectral e filtragem; Matplotlib, utilizada para a renderização do gráfico de espectro de frequências exibido na interface; SoundFile, apoiada na biblioteca nativa `libsndfile`, responsável pela leitura e escrita de arquivos de áudio nos formatos WAV, FLAC e OGG, com suporte a metadados; Tkinter, baseada no toolkit Tcl/Tk, que proveu o framework da interface gráfica, incluindo janelas, controles e layout; Pillow (Python Imaging Library), utilizada para manipulação de elementos gráficos e ícones da interface; pygame, empregada como engine de reprodução de áudio estéreo em tempo real; e winsound, módulo nativo do Windows utilizado como recurso complementar de saída sonora.

O software centraliza o acesso a todas as funcionalidades do sistema. Por meio da GUI (Interface gráfica do usuário), o usuário pode: (i) configurar as frequências-portadoras e a frequência de batida desejada; (ii) acionar o temporizador de sessão, controlando a duração da estimulação; (iii) visualizar o espectro FFT do sinal gerado; (iv) validar as batidas produzidas antes da reprodução; e (v) exportar o sinal sintetizado em formato de arquivo de áudio para uso externo.

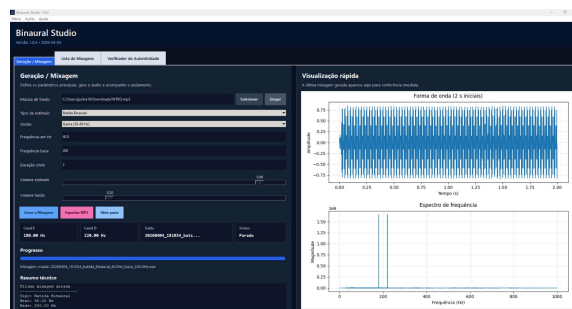


Figura 2. Interface gráfica do software desenvolvido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O software desenvolvido demonstrou plena capacidade de geração parametrizada de batidas binaurais e monaurais nas faixas de frequência de interesse clínico e experimental, contemplando as bandas delta (0,5–4 Hz), theta (4–8 Hz), alfa (8–13 Hz), beta (13–30 Hz) e gama (30–100 Hz), em concordância com a literatura especializada (Argibay et al., 2019; Oster, 1973).

A análise espectral por FFT confirmou a fidelidade dos sinais gerados, evidenciando a presença das frequências-portadoras e da frequência de batida resultante com precisão compatível com os parâmetros fornecidos pelo usuário. Não foram observadas distorções harmônicas significativas nos espectros analisados dentro das experimentações e testes de usabilidade realizados até o presente momento.

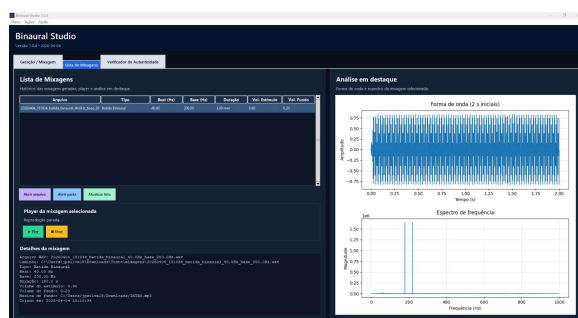


Figura 3. Interface gráfica da aba de lista de mixagem do software desenvolvido.

A interface gráfica apresentou operação intuitiva e resposta adequada aos comandos do usuário. As funcionalidades de configuração de frequência, temporizador de sessão, validação de batidas e exportação de áudio operaram conforme o especificado durante o desenvolvimento.

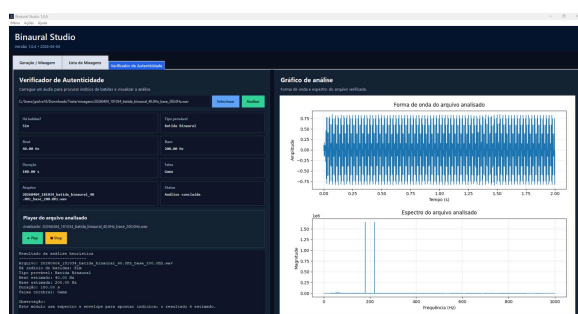


Figura 4. Interface do Verificador de Autenticidade embutido no software desenvolvido.

O software desenvolvido representa uma contribuição metodológica relevante para a área de estimulação auditiva terapêutica, ao oferecer uma ferramenta integrada, parametrizável e de código aberto para a geração e análise de batidas binaurais e

monaurais. A heterogeneidade metodológica observada na literatura, apontada como limitação central em revisões sistemáticas da área (Huang e Charyton, 2008; Kanzler et al., 2021), e parcialmente endereçada pelo presente sistema, que possibilita a padronização dos parâmetros de estimulação entre diferentes estudos.

A integração do módulo de análise FFT diretamente na interface do software constitui um diferencial relevante, ao permitir a validação instrumental dos sinais gerados sem necessidade de ferramentas externas. Esse recurso favorece a reprodutibilidade experimental e reduz a margem de erro decorrente de configurações inadequadas dos estímulos.

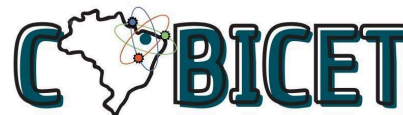
O sistema distingue-se de soluções comerciais por oferecer controle total sobre os parâmetros de síntese, transparência algorítmica e possibilidade de extensão para outros tipos de estimulação, como batidas isocrônicas. Pretende-se, em etapas subsequentes, utilizar o software como ferramenta central em experimentos de avaliação qualitativa dos efeitos sobre atenção, humor e ansiedade em populações específicas, incluindo indivíduos com TDAH e Transtorno do Espectro Autista (TEA) (Chaieb et al., 2015).

O módulo de validação dos sinais, faz uso de uma base de conhecimento restrita a 20 amostras, dentre as quais foram rotuladas de acordo com os parâmetros conhecidos como: Frequência, tipo de batida, taxa de amostragem. Devido a quantidade de amostras utilizadas, esta parte do sistema produz resultados com grande inconsistência, precisando de um maior conjunto para novos testes.

Como limitação do presente trabalho, destaca-se que a validação do software restringiu-se a testes internos de funcionalidade, sem aplicação em ensaios clínicos ou estudos controlados com participantes humanos. A condução de tais estudos constitui o próximo passo do projeto de pesquisa em curso.

CONCLUSÃO

O presente trabalho descreveu o desenvolvimento de um software em Python para geração e análise de batidas binaurais e monaurais, dotado de interface gráfica, análise espectral integrada por FFT, temporizador de sessão, validação de batidas e exportação de áudio. O sistema demonstrou desempenho satisfatório na síntese de sinais nas principais bandas de frequência de interesse clínico, com fidelidade espectral confirmada pela análise FFT. Entretanto, o mecanismo de validação dos sinais ainda está resultando em muitos resultados incorretos, este problema ainda precisa de estudos e testes mais aprofundados para atingir um grau de confiabilidade estatística.



A ferramenta desenvolvida preenche uma lacuna metodológica identificada na literatura, oferecendo aos pesquisadores um instrumento padronizado, acessível e extensível. Trabalhos futuros incluem a aplicação do software em experimentos controlados com participantes, o desenvolvimento de protocolo de avaliação qualitativa validado e o registro formal do software junto ao INPI.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário Internacional UNINTER, à Coordenação de Pesquisa e Publicações Acadêmicas, vinculada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão, à Escola Superior Politécnica (EPU) e ao curso de Engenharia Biomédica pelo suporte institucional e pelo incentivo ao desenvolvimento de pesquisas científicas no âmbito da graduação e inovação.

REFERÊNCIAS

ARGIBAY, M. G.; SANTED, M. A.; REALES, J. M. Efficacy of binaural auditory beats in cognition, anxiety, and pain perception: a meta-analysis. *Psychological Research*, 83, 357-372, 2019.

CHAIIEB, L. et al. Auditory beat stimulation and its effects on cognition and mood states. *Frontiers in Psychiatry*, 6, 70, 2015.

HUANG, T. L.; CHARYTON, C. A comprehensive review of the psychological effects of brainwave entrainment. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 14, 38-50, 2008.

KANZLER, S. A. et al. Effects of binaural beats and isochronic tones on brain wave modulation: literature review. *Revista Mexicana de Neurociencia*, 22, 238-247, 2021.

OSTER, G. Auditory beats in the brain. *Scientific American*, 229, 94-102, 1973.