

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS GUSTAVO GALINARI

ANÁLISE ESPECTRAL DA INTERAÇÃO ENTRE SINAIS DE EEG E ESTÍMULOS
MUSICAIS

Uberlândia

2025

LUIS GUSTAVO GALINARI

ANÁLISE ESPECTRAL DA INTERAÇÃO ENTRE SINAIS DE EEG E ESTÍMULOS
MUSICAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Biomédica

Área de concentração: Processamento Digital
de Sinais Biomédicos

Orientador: João Batista Destro Filho

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

G158 Galinari, Luis Gustavo, 2001-
2025 Análise espectral da interação entre sinais de EEG e estímulos musicais [recurso eletrônico] / Luis Gustavo Galinari. - 2025.

Orientador: João Batista Destro Filho .
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Biomédica.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia biomédica. I. , João Batista Destro Filho, 1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Biomédica. III. Título.

CDU: 62:61

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

LUIS GUSTAVO GALINARI

ANÁLISE ESPECTRAL DA INTERAÇÃO ENTRE SINAIS DE EEG E ESTÍMULOS
MUSICAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Biomédica

Área de concentração: Processamento Digital
de Sinais Biomédicos

Uberlândia, 27 de Agosto de 2025

Banca Examinadora:

Dr. Joao Batista Destro Filho

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

MSc. Gaspar Eugênio Oliveira Ramos

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Centro Universitário de Patos de Minas – UNIPAM

MSc. João Ludovico Maximiano Barbosa

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Itaú Unibanco S/A

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o apoio e carinho durante toda a minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Reginaldo e Fabiana, pois sem eles seria impossível completar mais esta etapa da minha vida. Muito obrigado pelo carinho, pelas orações, pelas ligações e por, mesmo à distância, estarem comigo o tempo todo. Agradeço também à minha irmã, Giulia, que, mesmo distante, sei o quanto torceu por mim.

Um agradecimento especial ao meu avô, João, e, de forma ainda mais especial, à minha avó, Rose, que com suas ligações quase sagradas todas as semanas, sempre me encheu de amor e matou um pouco a saudade que sentia deles.

Meu agradecimento à minha namorada, Gabrielle, que, durante toda a preparação deste trabalho, sempre me apoiou, alegrou e me acalmou.

Agradeço também, João Ludovico Maximiano Barbosa, por todo o conhecimento e ajuda que me passou durante todo o período da realização deste trabalho.

Ao meu orientador, João Batista Destro Filho, que me deu espaço, confiou e me guiou durante a realização deste trabalho.

E por fim, a Universidade Federal de Uberlândia por todas as experiências e amizades que realizei durante todos esses anos de graduação.

RESUMO

Este trabalho investigou a interação entre sinais de eletroencefalograma (EEG) e um estímulo musical por meio da análise espectral, com o objetivo de identificar correlações entre os domínios de frequência de ambos os sinais. A metodologia envolveu a coleta de dados de EEG de um voluntário durante a escuta de uma música de sua escolha, onde as bandas de frequência do áudio foram adaptadas proporcionalmente às bandas clássicas do EEG para permitir uma comparação direta. A análise foi conduzida em cinco trechos temporais representativos da estimulação musical, utilizando os quantificadores Densidade Espectral de Potência (DEP) e Percentual de Contribuição de Potência (PCP). Os resultados evidenciaram que a correlação entre o EEG e a música varia dinamicamente ao longo da exposição. As correlações positivas mais intensas foram observadas em trechos intermediários da estimulação (76-78 segundos), coincidindo com a predominância de baixas frequências no áudio e uma resposta similar na atividade cerebral, especialmente nas regiões frontais e temporais. Em contraste, os momentos iniciais (30-32 segundos) e finais (106-108 segundos) foram marcados por uma expressiva atividade na banda Alfa em regiões posteriores, associada a estados de relaxamento, e uma menor correlação com o estímulo. Conclui-se que o engajamento cerebral com a música evolui ao longo do tempo, refletindo processos de adaptação e imersão auditiva.

Palavras-chave: eletroencefalograma; música; análise espectral; sincronização neural; processamento de sinais biomédicos.

ABSTRACT

This study investigated the interaction between electroencephalogram (EEG) signals and a musical stimulus through spectral analysis, aiming to identify correlations between the frequency domains of both signals. The methodology involved collecting EEG data from a volunteer while listening to a self-selected piece of music, where the audio's frequency bands were adapted proportionally to the classic EEG bands to allow for a direct comparison. The analysis was conducted on five representative temporal excerpts of the musical stimulation using Power Spectral Density (PSD) and Percentage of Power Contribution (PCP) as quantifiers. The results showed that the correlation between the EEG and the music varies dynamically throughout the exposure. The most intense positive correlations were observed in intermediate excerpts of the stimulation (76-78 seconds), coinciding with the predominance of low frequencies in the audio and a similar response in brain activity, especially in the frontal and temporal regions. In contrast, the initial (30-32 seconds) and final (106-108 seconds) moments were marked by significant Alpha band activity in posterior regions, associated with states of relaxation, and a lower correlation with the stimulus. It is concluded that cerebral engagement with music evolves over time, reflecting processes of adaptation and auditory immersion.

Keywords: electroencephalogram; music; spectral analysis; neural synchronization; biomedical signal processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Posicionamento dos eletrodos no sistema 10-20.....	22
Figura 2 – Diagrama do protocolo de coleta do exame de EEG	23
Figura 3 – Exemplo de topografia gerada	26
Figura 4 – Espectro da média das magnitudes na música estimulada	34
Figura 5 – Trechos de 2 segundos da música e suas respectivas densidades espectralas por banda analógas de EEG.....	36
Figura 6 – Comparação das densidades espectralas do EEG e do estímulo musical no trecho de 30 a 32 segundos	37
Figura 7 – Comparação das densidades espectralas do EEG e do estímulo musical no trecho de 63 a 65 segundos	38
Figura 8 – Comparação das densidades espectralas do EEG e do estímulo musical no trecho de 76 a 78 segundos	40
Figura 9 – Comparação das densidades espectralas do EEG e do estímulo musical no trecho de 90 a 92 segundos	41
Figura 10 – Comparação das densidades espectralas do EEG e do estímulo musical no trecho de 106 a 108 segundos	42
Figura 11 – Comparação do PCP do EEG e do estímulo musical no trecho de 30 a 32 segundos	43
Figura 12 – Comparação do PCP do EEG e do estímulo musical no trecho de 76 a 78 segundos	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Épocas escolhida pelo neurologista no período da estimulação musical	28
Tabela 2 – Trechos de estimulação.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPM	Batidas Por minuto
CEP/UFU	Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal de Uberlândia
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> (Arquivo de valores separados por vírgula)
DEP	Densidade Espectral de Potência
ECG	Eletrocardiograma
EEG	Eletroencefalograma
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
FM	Frequência Mediana
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSECN	Comitê Internacional da Sociedade de Eletroencefalografia e Neurofisiologia Clínica
PCP	Percentual de Contribuição de Potência
PKL	Formato de arquivo <i>Pickle</i>
REM	<i>Rapid Eye Movement</i> (Movimento Rápido dos Olhos)
VSCode	<i>Visual Studio Code</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	<i>Objetivos Gerais</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	17
2	ESTADO DA ARTE	18
3	METODOLOGIA.....	20
3.1	COLETA DE DADOS.....	20
3.1.1	<i>Separação de épocas</i>	24
3.2	APRENDIZADO E ADAPTAÇÃO DO AMBIENTE COMPUTACIONAL.....	24
3.3	ANÁLISES ESTÁTISTICAS	27
3.3.1	<i>Voluntário</i>	27
3.3.2	<i>Pré-Processamento.....</i>	27
3.3.3	<i>Análise do áudio de estimulação</i>	28
3.3.4	<i>Criação de bandas proporcionais ao EEG</i>	29
3.3.5	<i>Seleção de trechos para análise</i>	29
3.3.6	<i>Quantificadores</i>	30
3.3.6.1	<i>Densidade Espectral de Potência (DEP).....</i>	30
3.3.6.2	<i>Percentual de Contribuição de Potência (PCP)</i>	31
4	RESULTADOS	33
4.1	ESPECTRO MÉDIO DE FREQUÊNCIA DO ÁUDIO	33
4.2	ANÁLISE DOS TRECHOS MUSICais.....	35
4.3	COMPARAÇÃO DA DEP ENTRE EEG E ÁUDIO.....	37
4.4	COMPARAÇÃO DO PCP ENTRE O EEG E ÁUDIO	42
5	DISCUSSÃO	46
5.1	DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (DEP)	46
5.2	PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA (PCP)	48
6	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS.....	51
ANEXO A	ENTREVISTA INICIAL COM VOLUNTÁRIO	57
ANEXO B	ENTREVISTA PRIMEIRA ETAPA	59

1 INTRODUÇÃO

A interação entre estímulos auditivos complexos, como a música, e a atividade elétrica cerebral tem sido objeto de interesse em estudos que envolvem processamento de sinais biomédicos. A análise dessa relação, por meio de registros eletroencefalográficos (EEG), permite investigar como diferentes padrões sonoros modulam as oscilações neurais em distintas faixas de frequência. Neste trabalho, busca-se compreender essa interação a partir de abordagens espectrais, com ênfase na análise de possíveis correlações entre as bandas do EEG e as propriedades acústicas da música, considerando aspectos energéticos dos sinais envolvidos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O campo da eletroencefalografia teve seus fundamentos estabelecidos no século XIX, com a identificação de potenciais elétricos em nervos periféricos e músculos de animais (STONE, HUGHES, 2013). Em 1924, com o trabalho pioneiro de Hans Berger, o eletroencefalograma foi desenvolvido, revolucionando a neurociência ao possibilitar a captação não invasiva da atividade elétrica cerebral (LA VAQUE, 1999). Em sua publicação de 1929, Berger apresentou os primeiros registros da atividade elétrica espontânea do cérebro humano, utilizando eletrodos de prata (ou estanho) fixados ao couro cabeludo com pasta condutora. Os sinais eram conduzidos até um galvanômetro de corda, altamente sensível, que permitia o registro gráfico das variações elétricas em fita fotográfica (HANS BERGER, 1929).

Atualmente, o EEG permanece como uma das principais ferramentas de investigação da atividade cerebral, devido à sua elevada resolução temporal e à capacidade de registrar, em tempo real, as oscilações elétricas geradas por populações de neurônios ativadas de forma sincronizada. Seu caráter não invasivo, aliado ao baixo custo e à facilidade de aplicação clínica, permite sua utilização com diferentes configurações de eletrodos em diversos ambientes, seja de pesquisa ou laboratorial (GAVARET, IFTIMOVICI, *et al.*, 2023).

Com a evolução do EEG, hoje é possível a análise de padrões associados a processos cognitivos e emocionais, sendo especialmente relevante para investigar respostas corticais a estímulos sensoriais, como os musicais, foco deste estudo (ZHANG, Hao, ZHOU, *et al.*, 2023).

A atividade elétrica cerebral captada pelo EEG é comumente distribuída em faixas de frequência, que são classificadas como: Delta (0,5–4 Hz), Teta (4–8 Hz), Alfa (8–13 Hz), Beta (13–30 Hz), e, nas faixas de alta frequência, Gama (30–80 Hz) e Super Gama (> 80 Hz) (DONALD L. SCHOMER, FERNANDO H. LOPES DA SILVA, 2017). Cada uma dessas

bandas espectrais está associada a estados mentais e fisiológicos específicos que são exemplificadas a seguir.

As ondas Delta predominam durante o sono profundo não REM (*Rapid Eye Movement* – Movimento Rápido dos Olhos), caracterizadas pela ausência de sonhos e consideradas vitais para a consolidação da memória (BERNARDI, BETTA, *et al.*, 2019). As ondas Teta são observadas em estado de sono leve, estados de relaxamento profundo e meditação, e apresentam papel importante na criatividade e processamento emocional. As ondas Alfa estão intimamente relacionadas ao relaxamento vigília, especialmente com os olhos fechados, refletindo um estado de segurança mental com atividade cortical reduzida (KATYAL, GOLDIN, 2021). As ondas Beta apresentam níveis elevados de atenção, concentração e atividade cognitiva consciente, estando vinculados a processos de foco intenso e pensamento ativo (BEPPI, RIBEIRO VIOLANTE, *et al.*, 2021). Por fim, as ondas Gama estão associadas a funções cognitivas complexas, como a integração sensorial, a comunicação rápida entre áreas específicas e o processamento de memória de curto prazo (DENG, WU, *et al.*, 2024).

Compreendida a base eletrofisiológica cerebral por meio do EEG, torna-se possível investigar como estímulos externos, como a música, influenciam a dinâmica cortical. A música, por sua vez, exerce um impacto profundo sobre o sistema nervoso central, sendo capaz de modular estados emocionais, cognitivos e fisiológicos (AZEVEDO, SILVA, *et al.*, 2024). Estudos demonstram que diferentes estilos musicais podem induzir alterações significativas nas bandas de frequência do EEG, refletindo variações nos níveis de atenção, relaxamento, excitação e processamento afetivo (ZHANG, Nan, LIU, *et al.*, 2025).

A música representa, de fato, um dos estímulos mais complexos processados pelo cérebro humano, pois integra simultaneamente informações auditivas, temporais, emocionais e motoras (KOELSCH, 2014). Sua estrutura rítmica e harmônica recruta uma ampla rede de áreas cerebrais, incluindo o córtex auditivo, regiões frontais, o sistema límbico e o circuito de recompensa, tornando-a um valioso modelo experimental para a neurociência cognitiva (ZATORREA, SALIMPOOR, 2013).

Essa complexidade fundamenta o uso da música como recurso terapêutico, explorado na musicoterapia, prática clínica que utiliza sons, ritmos e melodias para promover bem-estar (WIGRAM, PEDERSEN, *et al.*, 2002). Essa prática tem ganhado destaque em intervenções clínicas, revelando benefícios em contextos como ansiedade, depressão, dor crônica e reabilitação neurológica (T. ZAATAR, ALHAKIM, *et al.*, 2024). Intervenções musicais demonstram modular padrões de EEG, e abordagens avançadas, como o *hyperscanning* (técnica consiste em registrar, de forma simultânea e sincronizada, a atividade cerebral de duas ou mais

pessoas enquanto elas interagem), revelam a sincronização neural entre paciente e terapeuta, evidenciando o papel da música na regulação emocional e na criação de vínculos interpessoais (FACHNER, MAIDHOF, *et al.*, 2019).

Estudos em neurociência musical demonstram que diferentes características da música, como ritmo, melodia, andamento e intensidade, modulam bandas específicas do EEG (DOS ANJOS, DI RIENZO, *et al.*, 2024). Apesar desses avanços, a maior parte das pesquisas se concentra na análise estática da potência por bandas ou em potenciais evocados médios. Essa abordagem, contudo, deixa de explorar a correlação dinâmica entre o sinal de EEG e a estrutura acústica da música ao longo do tempo, ignorando o caráter contínuo e temporalmente estruturado do estímulo musical (DOELLING, POEPPEL, 2015).

Diante dessa lacuna, o presente trabalho propõe a análise da correlação espectral entre os sinais de EEG e a música estimulada. O objetivo é investigar como diferentes faixas de frequência cerebral variam em função do estímulo musical e se há evidências de correlação entre a atividade elétrica cortical e a estrutura sonora. A identificação de tais padrões de correlação pode contribuir para uma melhor compreensão dos mecanismos neurofisiológicos envolvidos na experiência musical.

1.2 OBJETIVOS

Com base na contextualização apresentada e na relevância científica do tema, definem-se a seguir os objetivos que nortearam o desenvolvimento deste trabalho. O objetivo geral delimita o propósito central da pesquisa, enquanto os objetivos específicos detalham as etapas necessárias para sua consecução, orientando a metodologia adotada e a análise dos resultados.

1.2.1 Objetivos Gerais

Investigar a interação entre os sinais de eletroencefalograma (EEG) e estímulos musicais por meio da análise espectral, com ênfase na identificação de possíveis correlações espetrais entre os domínios de frequência do EEG e da música escutada, utilizando os quantificadores Densidade Espectral de Potência (DEP) e Percentual de Contribuição de Potência (PCP).

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal deste estudo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer critérios metodológicos rigorosos para a coleta e padronização dos sinais de EEG em resposta à música.

- Analisar o espectro de frequência do áudio musical e criar bandas proporcionais às faixas clássicas do EEG.
- Processar os sinais de EEG utilizando ferramentas computacionais para extração de quantificadores espectrais.
- Comparar a densidade espectral de potência entre o EEG e o estímulo musical em diferentes trechos temporais.
- Avaliar a contribuição relativa das bandas do EEG frente à música por meio do PCP.
- Investigar visualmente e descritivamente padrões de correlação ou sincronização entre o EEG e a estrutura acústica da música.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este trabalho se encontra organizado da seguinte forma:

CAPÍTULO 1 – Este capítulo apresenta uma introdução ao tema, contextualizando a interação entre música e sinais de EEG, além de definir o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

CAPÍTULO 2 – Revisão do estado da arte, abordando estudos relevantes sobre a relação entre estímulos musicais e EEG.

CAPÍTULO 3 – Descrição detalhada da metodologia adotada, incluindo o protocolo de coleta de dados, pré-processamento, análises estatísticas, definição dos quantificadores.

CAPÍTULO 4 – Apresentação e interpretação dos resultados obtidos, com análise da densidade espectral de potência (DEP) e do percentual de contribuição de potência (PCP) em diferentes trechos da estimulação musical.

CAPÍTULO 5 – Discussão dos principais resultados obtidos, destacando a abordagem de correlação extraída a partir dos quantificadores.

CAPÍTULO 6 – Conclusão dos resultados obtidos, ressaltando as limitações encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

A investigação da interação entre estímulos musicais e sinais eletroencefalográficos (EEG) tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada pelos avanços nas técnicas de aquisição e análise de sinais biomédicos. A música, pela sua estrutura acústica complexa e capacidade de evocar respostas emocionais e cognitivas, constitui um estímulo privilegiado para explorar as dinâmicas neurais em diferentes estados mentais. Nesse cenário, diversos estudos têm buscado identificar padrões de correlação entre propriedades acústicas da música e oscilações cerebrais captadas pelo EEG, com ênfase nas variações espectrais e temporais desses sinais.

A modulação cortical por estímulos musicais é um tema central na neurociência musical. (SCHAEFER, VLEK, *et al.*, 2011b) investigaram as modulações na banda alfa do EEG ao comparar a percepção musical com a imaginação da mesma peça em silêncio. Os autores observaram que a imaginação musical provocou maior ativação alfa, sobretudo em áreas occipito-parietais, fenômeno interpretado como modulação de uma rede atencional. Essa resposta estaria associada à inibição ativa de regiões corticais não essenciais, como as áreas visuais, favorecendo o foco atencional interno. O estudo demonstrou que a atividade alfa não se limita a refletir a presença de um estímulo, mas é sensível à direção do foco atencional (externo na percepção vs. interno na imaginação).

A influência do tempo musical, ou seja, a cadência musical também é relevante para compreender a modulação cortical. (YANG, SU, *et al.*, 2025) investigaram o impacto de músicas com tempos de 56, 108 e 156 batimentos por minuto (bpm) nos sinais de EEG, analisando a densidade espectral de potência e a conectividade cerebral. Os resultados mostraram que tempos rápidos (156 bpm) aumentam a potência nas bandas Beta e Gama, associadas à excitação, enquanto tempos lentos (56 bpm) elevam as bandas Teta e Alfa, ligadas ao relaxamento.

Pesquisas intracerebrais também oferecem evidências diretas sobre a representação neural do ritmo musical. (NOZARADAN, MOURAUX, *et al.*, 2017) registraram a atividade de regiões auditivas primárias e secundárias, como o giro de Heschl e o planum temporale, em pacientes com eletrodos implantados enquanto ouviam ritmos complexos. As respostas neurais de baixa (< 30 Hz) e alta frequência (> 30 Hz) acompanharam o padrão rítmico, com aumento seletivo da atividade de baixa frequência na taxa do ritmo percebido, sobretudo no planum temporale e em ritmos mais complexos. O efeito foi mais pronunciado na faixa de até 5 Hz,

típica da percepção temporal musical, sugerindo limitações para o processamento de ritmos excessivamente rápidos.

(WEINECK, WEN, *et al.*, 2022) investigaram a sincronização neural ao estímulo musical naturalista utilizando EEG, com foco na relação entre a atividade cerebral e diferentes características acústicas da música. O estudo examinou a sincronização neural em resposta a quatro atributos musicais (envelope de amplitude, derivada do envelope, eventos de batida e fluxo espectral) apresentados em várias velocidades (1 a 4 Hz), abrangendo o intervalo delta típico. Os resultados mostraram que a sincronização neural foi mais forte com o fluxo espectral, que capta variações na estrutura espectral da música ao longo do tempo, superando o tradicional uso do envelope de amplitude como marcador rítmico. Além disso, a maior sincronização ocorreu para músicas com tempos lentos (aproximadamente 1–2 Hz), próximos ao ritmo preferido para movimentos corporais e predominante na música pop ocidental. Ainda, a familiaridade e a facilidade na percepção do pulso musical foram associadas a um aumento na sincronização neural, indicando que a previsibilidade e o engajamento influenciam a resposta cerebral. Esses achados ampliam a compreensão sobre a dinâmica da sincronização cerebral com estímulos musicais complexos, sugerindo que o processamento neurofisiológico envolve seletivamente informações espetrais relevantes ao ritmo musical, e fornecem importantes fundamentos para estudos futuros que relacionam o EEG ao conteúdo acústico da música.

A literatura revisada evidencia que a interação entre música e EEG é modulada por múltiplos fatores, incluindo o foco atencional, o andamento musical, a complexidade rítmica e a familiaridade com o estímulo. Os estudos apontam que diferentes atributos acústicos influenciam seletivamente as bandas de frequência cerebral, com impactos distintos sobre a sincronização e a modulação cortical. Apesar dos avanços, permanece uma lacuna quanto à análise da correlação dinâmica e contínua entre música e EEG, abordagem que este trabalho busca explorar ao alinhar, proporcionalmente, as bandas de frequência do áudio às do EEG, possibilitando investigar padrões de sincronização espectral ao longo do tempo.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos que orientaram a condução do experimento, incluindo a de coleta de dados do voluntário, as estratégias de pré-processamento dos sinais, os processos para extrair os espectros dos estímulos sonoros, bem como a escolha dos trechos de interesse e os quantificadores empregados. A precisão metodológica visa não apenas assegurar a integridade dos dados coletados, mas também oferecer recursos para a interpretação coerente dos fenômenos neurofisiológicos observados.

3.1 COLETA DE DADOS

A etapa de coleta de dados foi planejada com o objetivo de garantir a obtenção de registros confiáveis, controlados e compatíveis com as exigências do protocolo experimental. Dado o caráter sensível dos sinais eletroencefalográficos (EEG), é fundamental padronizar tanto o perfil do voluntário quanto as condições do ambiente de gravação, a fim de minimizar interferências externas e variabilidades não controladas. Este capítulo apresenta os critérios adotados para seleção dos participantes, as instruções fornecidas previamente, a preparação do ambiente e os procedimentos técnicos utilizados durante a coleta dos dados.

A condução do processo de coleta de dados foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal de Uberlândia (CEP/UFU), sob o protocolo nº 82824017.5.0000.5152. Em conformidade com as diretrizes éticas e metodológicas, foram estabelecidos critérios de inclusão para a seleção do voluntário, com o objetivo de garantir a confiabilidade e a homogeneidade dos dados coletados. Os participantes deveriam ser adultos, sem histórico de patologias neurológicas, e não terem feito uso medicamentos neurológicos e/ou endócrinos há pelo menos um ano antes da data do registro.

Antes da realização do exame, o voluntário recebeu, por meio de mensagem de texto, instruções específicas para os dias que o antecederiam. Essas instruções foram:

- Não ingerir bebidas alcoólicas nas 40 horas anteriores ao registro;
- Evitar bebidas com cafeína na véspera do exame;
- Dormir entre 7 e 8 horas ininterruptas na noite anterior;
- Lavar o cabelo com sabão de coco na noite anterior ao exame, a fim de reduzir a oleosidade do couro cabeludo e melhorar a aderência dos eletrodos. Não lavar os cabelos com shampoo, condicionador ou outros produtos capilares.

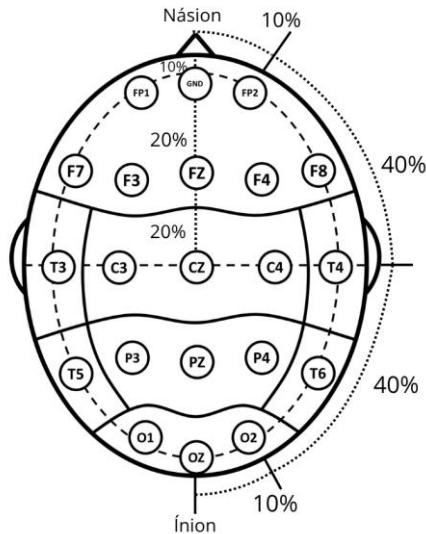
As coletas foram realizadas em um laboratório com ambiente amplo, climatizado com ar-condicionado para proporcionar maior conforto ao voluntário, e possuía cortinas nas janelas, permitindo o controle da iluminação e minimizando interferências externas. Os exames ocorreram aos sábados de manhã, com o objetivo de reduzir a presença de ruídos no campus. A equipe de coleta era composta por quatro integrantes: um responsável pelo manuseio do equipamento de EEG, um entrevistador e dois membros encarregados da colocação dos eletrodos.

Cada voluntário participou de uma entrevista prévia (ANEXO A), na qual foram coletadas informações pessoais como nome, local de residência, peso e idade. Foram investigadas também as preferências musicais, como estilos musicais favoritos e frequência semanal de escuta. Ao final da entrevista, o participante assinou um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, concordando com os procedimentos da estimulação a ser realizada.

Após essa etapa, iniciou-se a preparação para a captação dos sinais. Os 20 eletrodos do eletroencefalograma (EEG) foram posicionados de acordo com o sistema internacional 10-20, estabelecido pelo Comitê Internacional da Sociedade de Eletroencefalografia e Neurofisiologia Clínica (IFSECN) (SEECK, KOESSLER, *et al.*, 2017), sendo amplamente utilizado por proporcionar uma distribuição padronizada e confiável nas áreas corticais de interesse. Os eletrodos são nomeados segundo as regiões corticais subjacentes: FP (pré-frontal), F (frontal), C (central), P (parietal), O (occipital) e T (temporal), além da linha média (Z), que inclui posições como FZ, CZ e PZ. (KLEM, LÜDERS, *et al.*, 1999). A confiabilidade do sistema baseia-se em sua fundamentação anatômica, com pontos de referência fixos, como náspina, inión e pontos pré-auriculares, que asseguram correspondência consistente com regiões específicas do córtex cerebral, com variações interindividuais geralmente inferiores a 20 mm (HERWIG, SATRAPI, *et al.*, 2003).

Inicialmente, o couro cabeludo do participante foi medido em três eixos: do náspina ao inión (eixo sagital médio) e lateralmente entre os pontos auriculares. Em cada eixo, foram feitas marcações conforme a Figura 1, onde no sistema os pontos de referência são medidos em 10% nas extremidades e seguidas marcações de 20%. Essas marcações definiram os pontos de referência iniciais, Cz, Fp1, Fp2, Oz, O1, O2, T3 e T4, a partir dos quais os demais eletrodos foram posicionados até completar o arranjo de 20 canais segundo o sistema 10–20. Além disso, um par de eletrodos foi utilizado para captação do sinal de eletrocardiograma (ECG), posicionados na clavícula direita e no punho esquerdo do participante.

Figura 1 – Posicionamento dos eletrodos no sistema 10-20



Fonte: O autor

O equipamento utilizado para a captação dos sinais de EEG foi da marca Lynx, modelo BrainNet-BNT 36, configurado com frequência de amostragem de 400 Hz, constante de tempo em 16 segundos, filtro passa-baixa ajustado para 100 Hz, filtro passa-alta em 0.2 Hz e filtro Notch ativado. As gravações dos canais de EEG, bem como as marcações dos tempos de início e término de cada fase da coleta foram realizadas por meio do software EEGXP.

A coleta dos dados foi conduzida com o voluntário em repouso sentado em uma cadeira, em ambiente controlado, com temperatura agradável, iluminação reduzida e silêncio absoluto na sala. Antes do início da gravação, cada participante escolheu previamente uma música de sua preferência, a qual foi enviada à equipe responsável da organização do experimento. Durante a coleta, o participante, com os olhos fechados e imóvel, permaneceu em silêncio por três minutos. Em seguida, iniciou-se a reprodução da música previamente selecionada, por dois minutos. A reprodução foi realizada por meio de um aparelho celular, utilizando aplicativo de *streaming* (YouTube ou Spotify), posicionado a aproximadamente dois metros do voluntário e mantido em repouso durante todo o tempo. Ao término dessa etapa, o participante pôde abrir os olhos e se movimentar normalmente. Nesse intervalo, com aproximadamente um minuto de duração, foi conduzida uma breve entrevista, com foco nas sensações e nas emoções experimentadas pelo voluntário (ANEXO B).

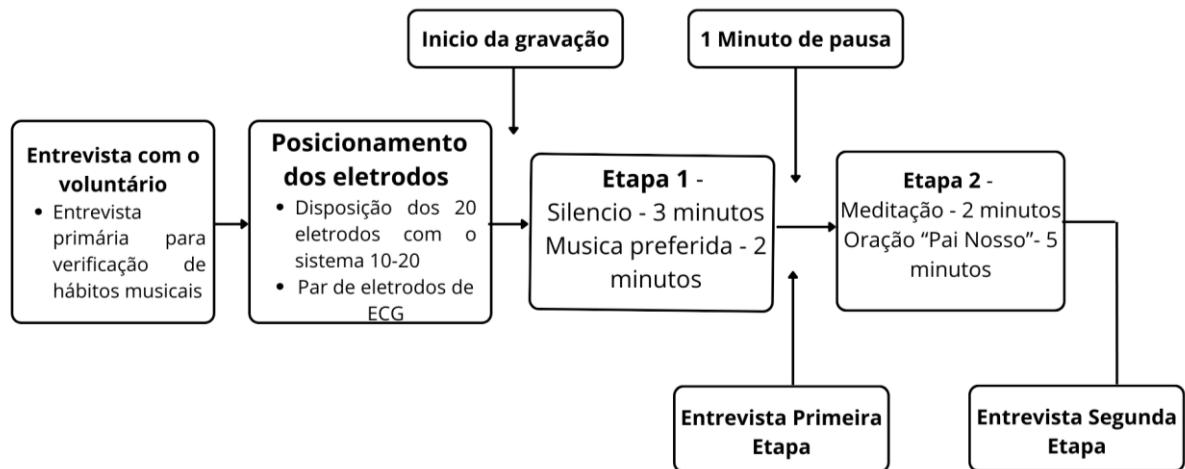
Na segunda etapa da coleta, o voluntário retornou à posição de exame (sentados em uma cadeira com o máximo de relaxamento possível) na qual se reproduzia uma música de meditação por dois minutos, música essa também escolhida pelo voluntário. Ao término,

iniciou-se a oração “Pai Nosso”, recitada pelos membros da equipe de pesquisa, por 5 minutos. A escolha dessa oração se justifica pelo seu amplo reconhecimento entre a população brasileira, sendo uma das preces mais tradicionais e difundidas no contexto do cristianismo. De acordo com o Censo do IBGE de 2022, 83,6% da população brasileira professa religiões cristãs (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2025), assim, sua popularidade contribui para uma experiência mais uniforme entre os participantes, independentemente da vertente religiosa específica a que pertençam.

Ao final da segunda etapa, foi realizada uma nova entrevista com o participante, com o objetivo de compreender como ele se sentiu durante os momentos de meditação e da oração recitada.

Todos os questionários aplicados durante as entrevistas foram preenchidos em formato impresso e armazenados fisicamente pela equipe. Além disso, foram tiradas fotografias das respostas e das assinaturas nos Termos de Consentimento, as quais foram digitalizadas e arquivadas em um drive de uso exclusivo dos pesquisadores.

Figura 2 – Diagrama do protocolo de coleta do exame de EEG



Fonte: O autor

A etapa de coleta de dados, ilustrada na Figura 2, foi conduzida com rigor metodológico, contemplando desde a definição dos critérios de participação até o registro dos sinais eletroencefalográficos em ambiente controlado. A configuração adequada do equipamento, aliada à padronização das fases do experimento, assegurou a obtenção de registros com qualidade suficiente para as análises posteriores. Os dados coletados nesta fase constituem a base empírica fundamental para o processamento e a interpretação dos sinais ao longo deste

trabalho. Ressalta-se que, apesar de todo o detalhamento do processo de coleta realizado pelo grupo de pesquisa, neste presente trabalho, foi utilizado apenas os dados da primeira etapa de coleta, especificamente da estimulação musical.

3.1.1 Separação de épocas

Após a realização das coletas, os exames foram analisados por um neurologista responsável, que selecionou dez épocas de interesse para cada condição experimental (Silêncio, Música Preferida, Meditação e Oração). Cada época, com duração de 2 segundos, corresponde a um segmento de sinal de EEG considerado ideal para capturar eventos rápidos da atividade elétrica cerebral, oferecendo alta resolução temporal e viabilizando a aplicação de técnicas de processamento e extração de características. A seleção baseou-se na avaliação clínica do neurologista, considerando a ausência de artefatos como movimentos involuntários ou interferências externas, a estabilidade do sinal e a relevância das características elétricas para os objetivos do estudo. Dessa forma, os trechos escolhidos representam períodos com maior potencial para a análise das respostas cerebrais aos estímulos auditivos.

3.2 APRENDIZADO E ADAPTAÇÃO DO AMBIENTE COMPUTACIONAL

As análises dos sinais de EEG desenvolvidas neste trabalho, assim como a manipulação das músicas que foram processadas juntamente com os sinais obtidos da coleta de dados foram realizadas na linguagem Python (versão 3.12.2), que, por ser gratuita e de código aberto, permitiu não apenas a redução de custos relacionados ao licenciamento de softwares como o Matlab®, mas também ampliou a flexibilidade para adaptações futuras e integração com diferentes bibliotecas científicas.

Para compreensão do processo, os arquivos “.PLG” correspondem a registros brutos gerados pelo equipamento de aquisição durante o exame, contendo os sinais elétricos captados em cada canal ao longo do tempo. Tais arquivos armazenam os dados contínuos do EEG em formato proprietário e necessitam ser convertidos e segmentados para viabilizar a análise posterior. O processo de conversão gera arquivos “.PKL”, que correspondem ao formato *Pickle*, utilizado pela linguagem Python para armazenar objetos de forma serializada. Nesses arquivos são registradas as amplitudes dos canais, bem como resultados intermediários ou finais do processamento, como valores de quantificadores extraídos e outros dados relevantes, prontos para serem reutilizados sem a necessidade de novo processamento.

As principais funções utilizadas no processamento dos dados, como a abertura de arquivos “.PLG” de EEG com base em parâmetros definidos em um arquivo “.CSV”,

segmentação dos sinais, recuperação de quantificadores salvos em arquivos “.PKL” e geração de topografias, foram inicialmente desenvolvidas por João Ludovico Maximiano Barbosa (LUDOVICO MAXIMIANO BARBOSA, et al., 2020), como parte de um tutorial interno do grupo de pesquisa. A partir desse material, foi realizado um estudo aprofundado de cada rotina, com o objetivo de compreender sua estrutura e adaptá-las às necessidades do presente trabalho.

Com base nos exames reais descritos na seção 3.1, foram utilizadas épocas previamente separadas pelo neurologista, esse processo está descrito em 3.1.1. Essas informações serviram de base para a construção do arquivo “.CSV” utilizado tanto no processo de familiarização com a linguagem de programação quanto nas análises desenvolvidas neste trabalho, que envolvem a comparação entre os dados de EEG e o estímulo sonoro. Nesse arquivo, foram inseridos o nome do arquivo “.PLG”, a quantidade de épocas, os tempos de início de cada uma, os quantificadores a serem processados e o nome do arquivo de saída “.PKL”.

Segundo o trabalho de (LUDOVICO MAXIMIANO BARBOSA, et al., 2020) dois quantificadores foram utilizados para a compreensão do tutorial, o Percentual de Contribuição de Potência (PCP) que representa a quantidade de energia contida em uma determinada faixa de frequência, permitindo identificar quais bandas se destacam em determinados momentos. A frequência mediana (FM) corresponde ao ponto do espectro em que 50% da potência total está concentrada em frequências inferiores e os outros 50% em frequências superiores. Trata-se de um método simples e eficaz para analisar a distribuição espectral do sinal de EEG, sendo útil na detecção de alterações abruptas nesse espectro (RAMOS, 2017).

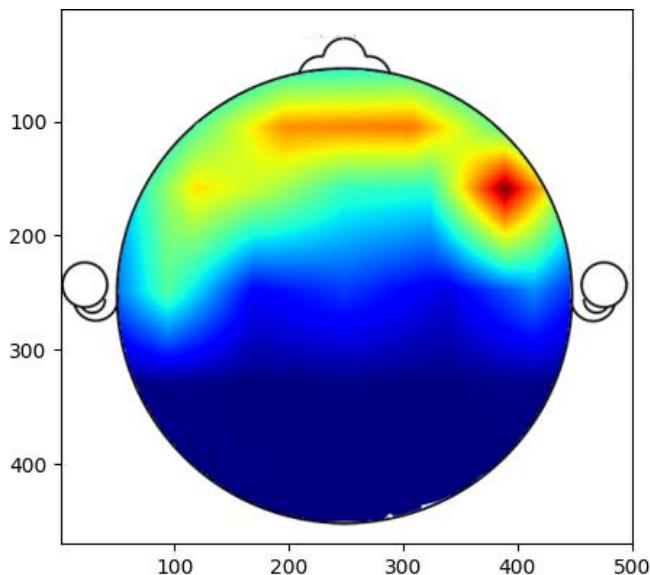
A primeira etapa consistiu na reprodução da rotina original descrita no tutorial, com o objetivo de aprender a estrutura de funcionamento do processamento e detectar possíveis erros ou limitações. Todos os testes foram realizados por meio do *prompt* de comando, dentro da pasta contendo os scripts Python. Durante essa fase, observou-se a importância da correta formatação do arquivo “.CSV”, especialmente no que diz respeito à nomenclatura das colunas, que deve coincidir exatamente com os nomes esperados pelos scripts, e à formatação dos tempos das épocas, que devem seguir o padrão “mm:ss”.

Após a execução bem-sucedida do processamento e geração dos arquivos “.PKL”, foram testadas as funções de extração dos quantificadores, como o PCP e a FM. Esses valores foram extraídos de épocas específicas, considerando todas as bandas de frequência disponíveis. As bandas de frequências utilizadas para os testes e análise futura foi Delta (1–3,5 Hz), Teta (3,5–7,5 Hz), Alfa (7,5–12,5 Hz), Beta (12,5–30 Hz), Gama (30–80 Hz) e Supergama (80–100 Hz)

Os comandos utilizados foram padronizados, comentados e adicionados ao tutorial, servindo como referência para usuários futuros. Também foram testadas rotinas que permitem a extração de um quantificador específico (PCP ou FM) para uma única banda de frequência ao longo de todas as épocas.

Além disso, foi realizada a geração de visualizações topográficas com base nos quantificadores processados. Essas visualizações, que ilustram a distribuição espacial das frequências captadas pelos 20 eletrodos, foram criadas a partir dos valores calculados. As funções empregadas, juntamente com exemplos de comandos, resultados e imagens geradas, foram organizadas e integradas a um tutorial, promovendo a clareza e a reproduzibilidade do processo.

Figura 3 – Exemplo de topografia gerada



Fonte: O autor

Outra função importante testada e comentada no tutorial foi a de geração da média dos quantificadores entre diferentes exames. Essa rotina permite calcular a média dos valores obtidos para diversos quantificadores, considerando diferentes bandas de frequência e épocas, a partir de múltiplos exames processados.

Para a execução dessa função, foi necessário organizar um arquivo “.CSV” contendo a lista de todos os exames que deveriam ser analisados. A partir desse arquivo, os respectivos arquivos “.PKL” foram gerados individualmente. Após essa etapa, a função responsável pelo cálculo da média dos quantificadores foi aberta em um ambiente de desenvolvimento, *Visual Studio Code* (VSCode), onde os caminhos de todos os arquivos “.PKL” foram inseridos

manualmente. Como resultado, o script retorna os valores médios dos quantificadores especificados, assim como as respectivas imagens de topografia associadas a cada condição avaliada.

Com a compreensão e testes das rotinas, o ambiente de análise em Python mostrou-se robusto, funcional e preparado para aplicação aos dados experimentais. O domínio dessas ferramentas foi essencial para possibilitar a análise dos sinais EEG diante dos estímulos musicais, apresentada no próximo capítulo.

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A seção a seguir apresenta os passos para as análises estatísticas realizadas neste trabalho. Entre elas está a escolha do voluntário, a manipulação e análise do áudio de estimulação e por fim a descrição dos quantificadores utilizados.

3.3.1 Voluntário

Nesta seção são apresentados os dados coletados por meio do questionário (ANEXO A) respondido pelo participante, conforme descrito na Seção 3.1, os quais foram utilizados para contextualizar as análises de sincronização entre os sinais de EEG e os estímulos sonoros. Apenas um voluntário foi selecionado para a análise, de forma aleatória, sem consideração de gênero, idade, habilidade ou formação musical, a partir da base de dados registrada entre fevereiro e abril de 2024. Com isso, o participante analisado apresenta as seguintes características.

- Gênero Masculino;
- 43 anos de idade;
- Não possui nenhuma dificuldade auditiva;
- Não possui nenhuma formação musical;
- Não sabe tocar nenhum instrumento musical;
- Hábito de ouvir música, aproximadamente, 5 vezes semanalmente.

A música de estimulação escolhida pelo voluntário corresponde ao gênero “gospel” e pode ser acessada com o link a seguir.

Link da música utilizada na estimulação:

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=OXBCV5WixCU>

3.3.2 Pré-Processamento

O pré-processamento ocorre em duas etapas importantes. A primeira etapa se dá pela separação de épocas feita pelo neurologista responsável, descrito em 3.1.1.

Na segunda etapa de pré-processamento, foi onde realizado o processamento do arquivo bruto gerado pelo software em um arquivo “.PKL” como descrito na seção 3.2. Nessa etapa, processamos todas as épocas separadas pelo neurologista, além dos quantificadores a serem utilizados. As 10 épocas escolhidas pelo neurologista durante a estimulação auditiva está presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Épocas escolhida pelo neurologista no período da estimulação musical

Época 1	Época 2	Época 3	Época 4	Época 5	Época 6	Época 7	Época 8	Época 9	Época 10
03:20	03:27	03:30	03:48	04:03	04:16	04:27	04:30	04:35	04:46

Fonte: O autor

Após essas duas etapas foi obtido todas as informações necessárias do EEG para a análise de correspondência, sincronia e/ou correlação com o áudio de estimulação.

3.3.3 Análise do áudio de estimulação

Para processar o áudio selecionado pelo voluntário, foi realizado o download do arquivo no formato “.MP3” a partir do mesmo Link utilizado durante a estimulação. Ressalta-se que esse arquivo foi usado exclusivamente para fins de processamento de dados, sem reprodução pública.

Para a análise do arquivo de áudio, buscou-se ferramentas específicas que permitissem visualizar a forma de onda no domínio do tempo, identificar a frequência de amostragem e selecionar os trechos de interesse para análise.

Com o objetivo de identificar as frequências predominantes no áudio, calculou-se o espectro de frequência médio da música. O áudio, com duração total de 120 segundos (tempo de estimulação), foi segmentado em trechos de 1 segundo para capturar variações temporais nas características espetrais. Para cada segmento, aplicou-se a Transformada de Fourier, gerando uma matriz de 120 linhas por 24.000 colunas, considerando apenas a parte positiva do espectro (frequência de amostragem de 48.000 Hz), uma vez que as frequências negativas não acrescentam informações relevantes. A média das magnitudes por frequência foi utilizada para obter o espectro médio, permitindo identificar as faixas de frequência com maior energia e aquelas com pouca ou nenhuma atividade. Esse processo possibilitou a determinação da banda

de interesse, definida como a faixa com atividade espectral significativa, cujos detalhes serão apresentados nos resultados.

3.3.4 Criação de bandas proporcionais ao EEG

Como já descrito na seção 1.1, as bandas de frequência do EEG podem ser categorizadas das baixas frequências (Delta e Teta) a altas frequências (Gama e Supergama). Com base nisso, e de forma análoga, as frequências da banda de interesse do áudio identificada com o seu respectivo espectro médio de frequência foram divididas em bandas proporcionais a banda de EEG. Para essa divisão utilizou-se a equação 1:

$$\Delta x = \frac{\Delta y}{\Delta e} * z \quad (1)$$

Sendo:

Δx — Largura da banda de áudio

Δy — Largura da banda de EEG

Δe — Largura total do EEG

z — Frequência máxima de interesse do áudio.

Na equação 1, a largura de cada banda de EEG é dividida pela diferença de frequência máxima e mínima utilizada no EEG, multiplicada pela frequência máxima da banda de interesse de áudio. A adaptação das bandas de áudio possibilita o mapeamento das frequências predominantes do estímulo em intervalos proporcionais às bandas de EEG, favorecendo a investigação sobre a influência das densidades espetrais distribuídas do áudio nas respostas neurais durante a estimulação.

3.3.5 Seleção de trechos para análise

Para a análise de correlação entre o EEG e a música estimulada, foram selecionados cinco trechos de dois segundos cada, dedicados à avaliação da densidade espectral. Esses trechos foram extraídos a partir das dez épocas previamente identificadas pelo neurologista, com o intuito de abranger de maneira representativa os momentos inicial, intermediário e final da estimulação. Essa abordagem estratégica permitiu uma distribuição equilibrada ao longo do período de análise, capturando a dinâmica temporal da resposta neural. O objetivo principal dessa segmentação foi examinar a evolução dos quantificadores espetrais, oferecendo uma

visão abrangente sobre as variações de energia e padrões de frequência ao longo do processo de estimulação, contribuindo assim para uma compreensão mais detalhada das interações entre o estímulo auditivo e a atividade cerebral.

3.3.6 Quantificadores

A quantificação da atividade cerebral em resposta ao estímulo musical exige o uso de métricas que capturem as variações espectrais dos sinais eletroencefalográficos. Para isso, foram selecionados dois quantificadores essenciais que, juntos, fornecem uma visão clara sobre a distribuição e a contribuição energética das diferentes bandas de frequência. A Densidade Espectral de Potência (DEP) identifica como a energia do sinal se distribui ao longo do espectro de frequências, enquanto o Percentual de Contribuição de Potência (PCP) avalia a participação relativa de cada banda no sinal total. O estudo com esses indicadores oferece uma estrutura confiável para comparar os domínios espectrais do EEG e do estímulo auditivo, apoiando os objetivos analíticos do estudo.

3.3.6.1 Densidade Espectral de Potência (DEP)

O DEP descreve como a potência de um sinal está distribuída no domínio da frequência e é comumente estimada por métodos baseados na transformada de Fourier (WELCH, 1967). O DEP é definido como o quadrado da magnitude da transformada de Fourier discreta de um sinal, normalizado pelo número de amostras e pela taxa de amostragem em:

$$DEP(f) = \left(\frac{|FFT(f)|}{n} \right)^2 \times \frac{2}{F_s} \quad (2)$$

Onde:

- n – Número de amostras.
- F_s – Frequência de amostragem do sinal.
- $FFT(f)$ – Transformada de Fourier Discreta do sinal.

A DEP média por banda corresponde à média aritmética da Densidade Espectral de Potência (DEP) calculada ao longo de um intervalo de frequências específico. Para o EEG, consideraram-se esse intervalo as faixas de frequência descritas na seção 3.2. Para a música

considera as bandas proporcionais desenvolvidas em 3.3.4. Com isso utiliza-se a equação 3 para calcularmos a DEP de cada banda de frequência:

$$DEP_{média\ da\ banda} = \frac{1}{F_{fim} - F_{início}} \sum_{f=F_{início}}^{F_{fim}} DEP(f) \quad (3)$$

Sendo:

- F_{fim} – Frequência final da banda.
- $F_{início}$ – Frequência inicial da banda.
- $DEP(f)$ – Densidade Espectral de potência em cada intervalo de frequência.

Essa abordagem possibilita uma comparação equitativa entre bandas de larguras distintas, evitando que faixas mais amplas pareçam conter mais energia simplesmente devido à sua extensão espectral. Dado que os sinais de EEG e áudio apresentam escalas de potência significativamente diferentes, torna-se essencial normalizar a distribuição espectral para viabilizar a comparação, transformando os valores absolutos em proporções relativas e permitindo a análise da distribuição de energia entre as bandas, independentemente da magnitude total do sinal. Para a normalização da DEP de cada banda de frequência utiliza-se 4:

$$DEP_{normalizada} = \frac{DEP_{média\ por\ banda}}{\sum DEP(f)} \quad (4)$$

3.3.6.2 Percentual de Contribuição de Potência (PCP)

O Percentual de Contribuição de Potência é um quantificador que indica a fração da energia contida em uma determinada faixa de frequência em relação à energia total do sinal. Como descrito em (RAMOS, 2017) ele é obtido a partir da densidade espectral de potência do sinal, previamente normalizada. As bandas de frequência são comumente separadas segundo faixas características como Delta, Teta, Alfa, Beta, Gama e Supregama, além de subdivisões específicas, conforme critérios definidos na literatura.

Com isso para determinar o PCP, é preciso primeiramente determinar a potência total (P_t) do sinal em cada seguimento (i). P_t é definida pela integral da DEP normalizada em cada frequência no segmento de interesse, e pode ser determinada conforme 4.

$$P_t = \int |DEPn_f i(f)|^2 df \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (4)$$

Sendo:

- $DEPn_f$ - Densidade espectral de potência normalizado.
- i – Segmento considerado.
- f – Frequência.
- P_t – Potência total no segmento i .

A partir desse valor, o PCP é calculado como a razão entre a potência da banda específica de interesse e a potência total do sinal, como mostrado na equação 5.

$$PCP_{ritimo} = \frac{\int_{f_{in ritimo}}^{f_{out ritimo}} |DEPn_f i(f)|^2 df}{P_t} \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (5)$$

Sendo

- P_t – Potência total do sinal no segmento i .
- PCP_{ritimo} – Porcentagem de potência espectral do ritmo, no segmento i .
- $f_{out ritimo}$ – Frequência final do ritmo.
- $f_{in ritimo}$ – Frequência inicial do ritmo.
- S – Quantidade total de segmentos.
- $DEPn_f(f)$ – Densidade espectral de potência na época i .

Esse cálculo permite verificar a contribuição relativa de cada faixa de frequência ao sinal global, sendo uma métrica amplamente utilizada em estudos que envolvem a análise espectral de sinais fisiológicos (DONALD L. SCHOMER, FERNANDO H. LOPES DA SILVA, 2017), como os sinais de EEG.

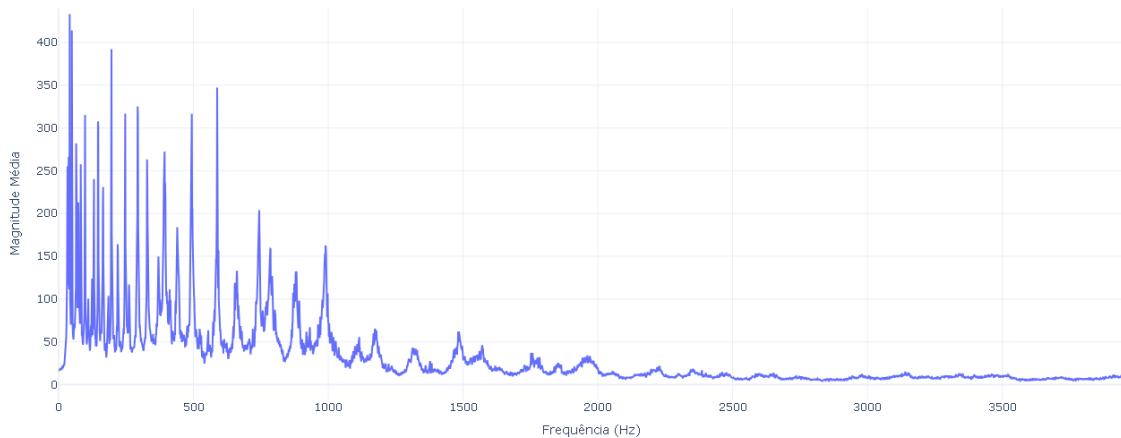
4 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir refletem a aplicação das técnicas de processamento descritas na metodologia, buscando investigar padrões de correspondência entre a atividade eletroencefalográfica e os estímulos musicais. A análise foi conduzida com foco na comparação espectral entre os sinais, considerando diferentes trechos temporais da estimulação e distintas regiões corticais. Por meio da avaliação dos espectros médios de frequência do áudio, e da aplicação dos quantificadores DEP e PCP, foram identificadas dinâmicas espaciais que contribuem para a compreensão dos efeitos da música sobre a modulação cortical.

4.1 ESPECTRO MÉDIO DE FREQUÊNCIA DO ÁUDIO

Para identificar as frequências predominantes no áudio analisado, foi gerado o espectro médio de frequência da música. Inicialmente, o áudio original foi exportado e segmentado em trechos de um segundo, conforme descrito na seção 3.3.3. Considerando que o tempo total de estimulação foi de 120 segundos, foram obtidos 120 segmentos para o cálculo do espectro de frequência e posterior determinação da média. Para cada trecho, foi calculada a transformada de Fourier e sua respectiva magnitude. Isso resultou em uma matriz com 120 linhas e 24.000 colunas, sendo cada linha correspondente a um segundo da música e cada coluna a uma frequência de 1 Hz. A frequência de amostragem do áudio foi de 48.000 Hz, e como a análise considerou apenas a parte positiva do espectro, o intervalo de frequência total foi de até 24.000 Hz. Em seguida, foi gerado um vetor médio das magnitudes, calculado pela média das colunas da matriz, e a partir desse vetor foi gerada a imagem (Figura 4) do espectro para identificar as frequências de maior energia. Essa metodologia permitiu analisar as regiões do sinal com maior concentração de energia, identificar as frequências mais intensas e determinar as faixas onde a energia do sinal se torna insignificante.

Figura 4 – Espectro da média das magnitudes na música estimulada



Fonte: O autor

A Figura 4 mostra que as frequências mais significativas do espectro médio estão entre 0 e 1.000 Hz., tendo picos significativos superiores a 300 de magnitude, além de pontos entre 400 e 450 de magnitude entre 40 e 50 Hz. Após os 1.000 Hz as magnitudes já não estão mais tão presentes, porém ainda há uma presença oscilando entre 30 e 60 de magnitude até 2.000 Hz. Após os 2.000 Hz de frequência a magnitude já se encontra extremamente baixa, não passando de 25. Com base nisso, é possível selecionar uma banda de interesse de 0 a 2.000 Hz, onde é identificado as frequências mais significativas do espectro.

Essa banda de interesse nos dá uma referência da banda em que estamos analisando. Com ela é viável delimitar as frequências em baixa, média e alta frequência.

Como o resultado da seleção da banda de frequência significativa para as análises posteriores, realizamos com a equação 1 a divisão da banda significativa nas faixas de baixa a alta frequência de forma análoga as bandas do EEG, ou seja, com a mesma proporção entre as seis bandas.

Portanto, exemplificando a primeira banda utilizando a equação 1 temos que:

$$\Delta\text{Delta} = \frac{(3,5 - 1)}{99} * 2000$$

$$\Delta\text{Delta} = 50.51$$

Com isso, temos que o intervalo da banda Delta irá de 0 a 50.51 Hz, e consequentemente a banda posterior (Teta) irá de 50.51 a $50.51 + \Delta\text{Teta}$. Após essa divisão chegamos nas bandas musicais proporcionais ao EEG:

- Delta: 0 a 50.51 Hz;
- Teta: 50.51 a 131.32 Hz;
- Alfa: 131.32 a 232.32 Hz;
- Beta: 232.32 a 585.86 Hz;
- Gama: 585.86 a 1595.96 Hz;
- Supergama: 1595.96 a 2000.00 Hz.

4.2 ANÁLISE DOS TRECHOS MUSICAIS

Os cinco trechos musicais analisados, cada um com dois segundos de duração, foram definidos a partir da avaliação de épocas realizada pelo neurologista detalhada em 3.1.1, com o objetivo de contemplar momentos representativos do início, meio e fim da estimulação. Esses intervalos estão detalhados na Tabela 2.

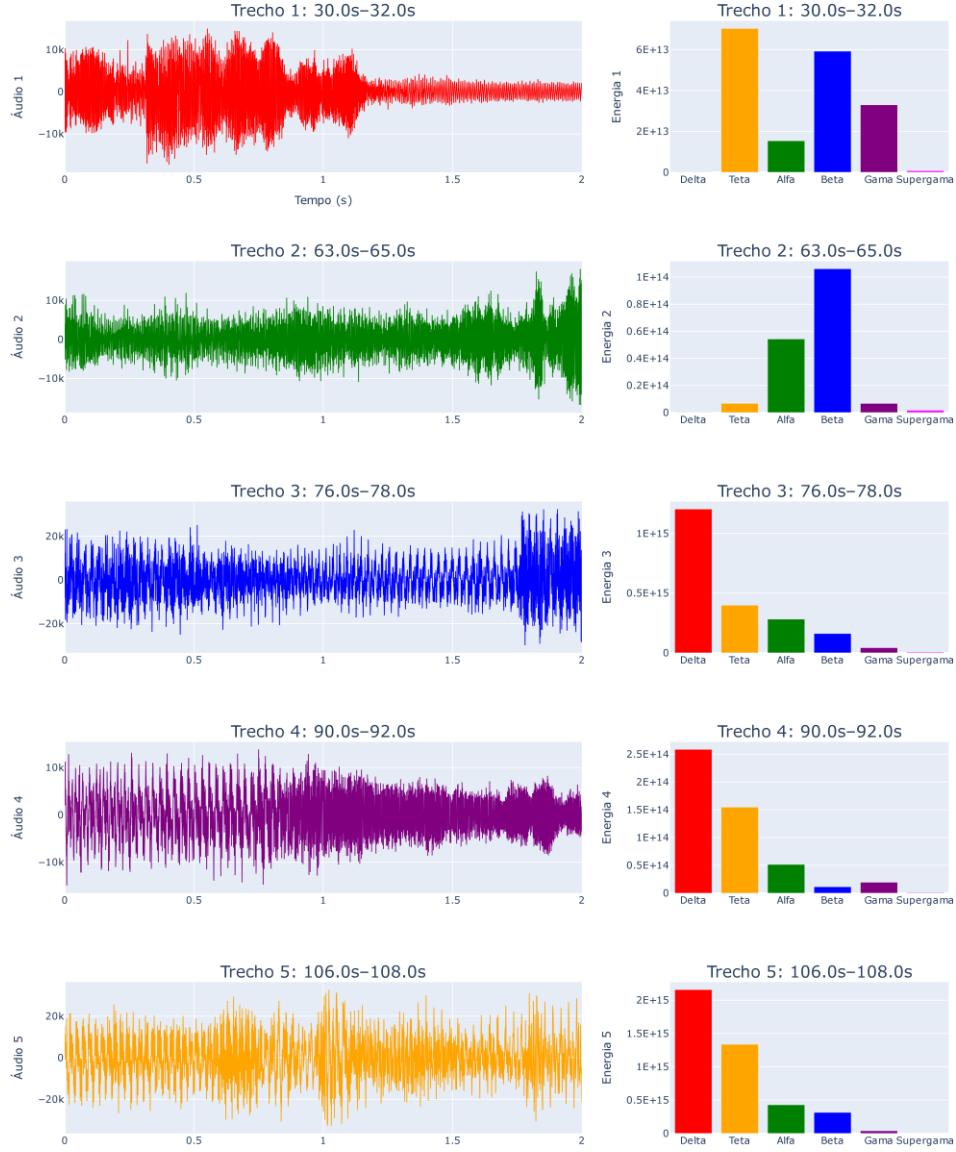
Tabela 2 – Trechos de análise da estimulação

Trechos	Tempo de início	Tempo final
Trecho 1	30 segundos	32 segundos
Trecho 2	63 segundos	65 segundos
Trecho 3	76 segundos	78 segundos
Trecho 4	90 segundos	92 segundos
Trecho 5	106 segundos	108 segundos

Fonte: O autor

Com base nessa seleção, a Figura 5 apresenta as densidades espectrais correspondentes juntamente com seu respectivo sinal temporal, permitindo a visualização da distribuição de energia em cada faixa de frequência análoga às bandas do EEG.

Figura 5 – Trechos de 2 segundos da música e suas respectivas densidades espectrais por banda análogas de EEG



Fonte: O autor

De acordo com os trechos gerados do sinal temporal e suas respectivas densidades espectrais, no primeiro trecho analisado foi observada uma concentração de densidade nas faixas de baixa (Teta), média e alta frequência (Gama), enquanto as bandas extremas (Delta e Supergama) não apresentaram valores significativos. Já no segundo trecho, houve predominância das bandas de médias freqüências (Alfa e Beta), com densidades significativas apenas nessas faixas, enquanto as baixas e altas freqüências não apresentaram densidade relevante.

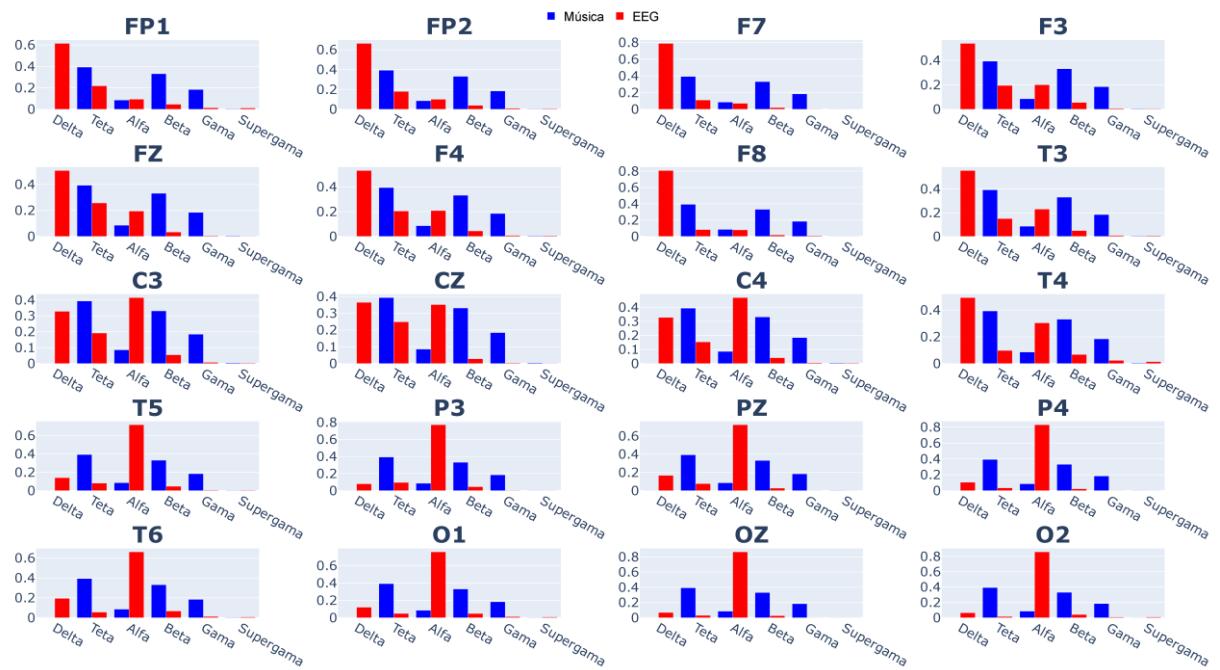
Nos trechos 3, 4 e 5 é visível uma predominância das bandas análogas a baixa frequência, ou seja, Delta e Teta. Nesses três trechos, observa-se um decaimento de densidade conforme as bandas de frequências vão ficando mais altas, principalmente nos trechos 3 e 5. No trecho 4, esse decaimento também é visível, porém com um pequeno aumento de densidade na banda Gama, entre a transição Beta para Gama.

4.3 COMPARAÇÃO DA DEP ENTRE EEG E ÁUDIO

A seguir, apresenta-se a comparação para os cinco trechos, entre a DEP do EEG e do estímulo musical. Para essa análise realizou-se um gráfico de barras para cada canal do EEG, onde as colunas indicam as densidades espetrais normalizadas nas bandas clássicas de frequência (Delta, Teta, Alfa, Beta, Gama e Supergama) tanto para o áudio quanto para o sinal cerebral. O objetivo é avaliar a correlação (positiva, negativa ou nula) entre as bandas de frequência da música e a resposta cortical medida por EEG.

A Figura 6 apresenta a comparação da densidade espectral normalizada entre o sinal da música e os canais de EEG para o intervalo de 30 a 32 segundos.

Figura 6 – Comparação das densidades espetrais do EEG e do estímulo musical no trecho de 30 a 32 segundos



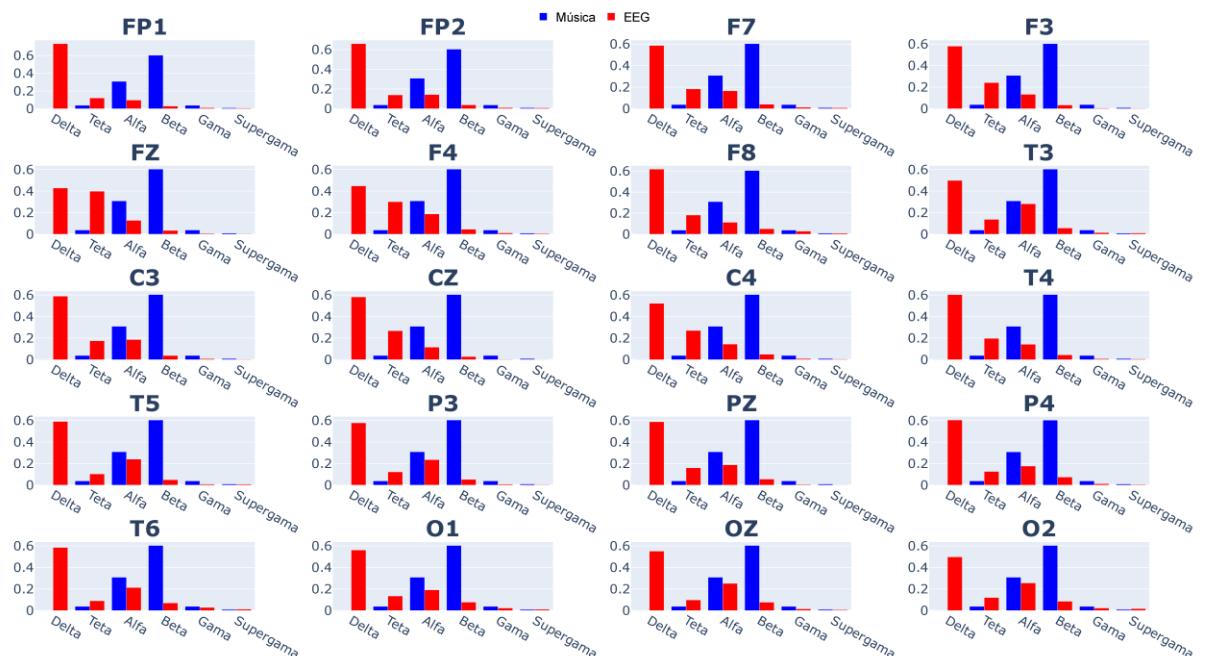
Fonte: O autor

A Figura 6 revela que os canais frontais do EEG apresentam um decaimento na densidade espectral à medida que as frequências aumentam. A banda Delta destaca-se como a de maior densidade nesses canais, com valores de até 80% nos canais F8 e F7. Nos demais canais da região frontal, a densidade na banda Delta varia entre 50% e 60%. Nos canais centrais, também nos específicos T3 e T4, observa-se uma distribuição da densidade espectral espalhada entre as bandas Delta e Alfa, sem predominância significativa em nenhuma faixa de frequência em particular. Nas regiões occipitais, parietais e, em especial, no canal T5, destaca-se uma predominância marcante na banda Alfa. Nesses canais, a densidade espectral atinge picos de até 80% nos canais P3, P4, Oz e O2. Os demais canais analisados nessa região apresentam densidades superiores a 60%.

A comparação entre as densidades espetrais do EEG e do estímulo musical, conforme apresentado na Figura 6, não permite concluir de forma clara a existência de correlação positiva ou negativa. As regiões corticais exibem comportamentos distintos, particularmente nas áreas frontais, occipitais e parietais, como observado anteriormente. Contudo, ao confrontar essas densidades com as do áudio, não se observa um padrão consistente de correlação.

No trecho seguinte, a Figura 7 apresenta a comparação das densidades espetrais do EEG e do estímulo musical referente ao trecho de 63 a 65 segundos.

Figura 7 – Comparaçāo das densidades espetrais do EEG e do estímulo musical no trecho de 63 a 65 segundos



Fonte: O autor

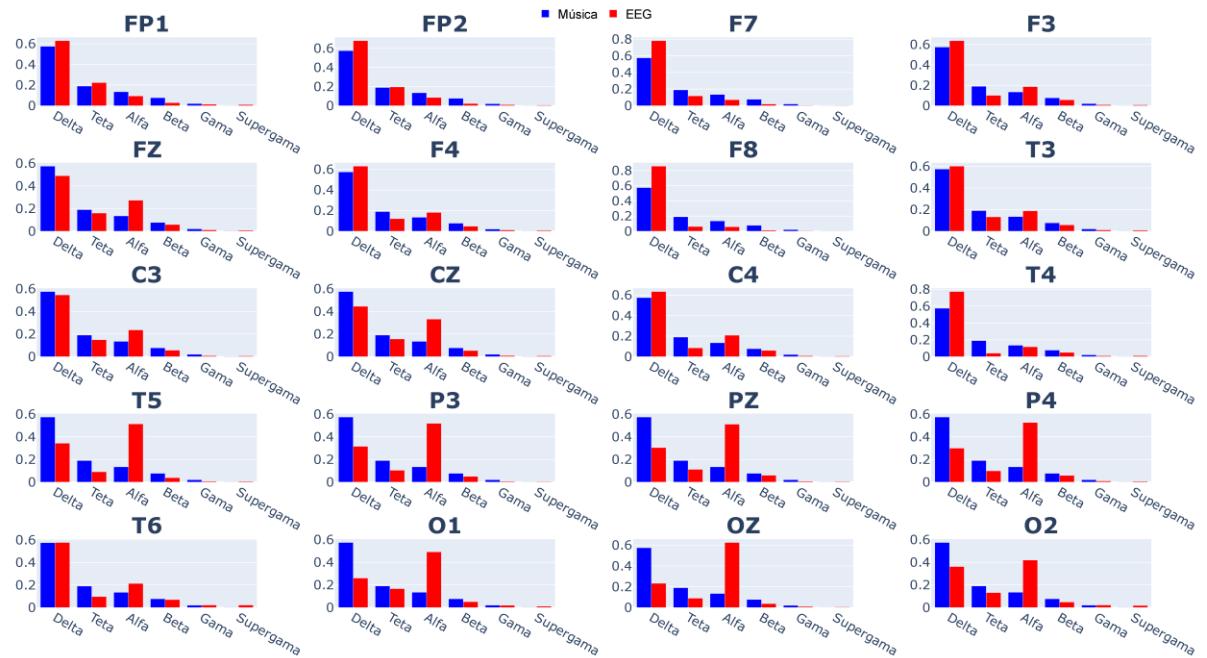
A Figura 7 evidencia que, no trecho de 63 a 65 segundos de estimulação, a banda Delta apresenta uma presença significativa em todas as regiões cerebrais analisadas. Diferentemente do trecho anterior (30 a 32 segundos), o decaimento da densidade espectral com o aumento da frequência é observado em todos os canais de EEG, não se restringindo à região frontal. Nos canais occipitais e parietais, a banda Alfa, que no trecho anterior mostrava predominância, exibe valores inferiores à banda Delta neste intervalo. Apesar disso, a banda Alfa mantém uma leve superioridade em relação à banda Teta nesses canais, embora o decaimento da densidade permaneça evidente, com a banda Delta destacando-se como a de maior magnitude.

Observa-se ainda que, no intervalo de 63 a 65 segundos, a correlação entre as densidades espetrais do EEG e do estímulo musical apresenta padrão negativo em todos os canais analisados. Essa correlação negativa manifesta-se nas bandas de frequência de Delta a Beta, caracterizando-se por um decaimento da densidade espectral no EEG, conforme descrito anteriormente, em oposição ao aumento da densidade do áudio até a banda Beta.

Embora não tenham apresentado destaque na análise de correlação, os canais de alta frequência exibiram valores semelhantes de porcentagem de densidade em todas as regiões. Essas bandas demonstraram comportamento pouco expressivo em comparação com outras faixas espetrais, mantendo densidades inferiores a 5%.

Conforme ilustrado na Figura 8, apresenta-se a comparação entre as densidades espetrais do EEG e do estímulo musical no intervalo de 76 a 78 segundos, onde já se passa metade do tempo de estimulação.

Figura 8 – Comparação das densidades espetrais do EEG e do estímulo musical no trecho de 76 a 78 segundos



Fonte: O autor

Com o avanço da estimulação, o trecho de 76 a 78 segundos da música foi analisado. A Figura 8 evidencia a predominância da banda Delta, acompanhada por um decaimento da densidade espectral com o aumento das frequências nas regiões frontais, temporais e centrais. Essa predominância é mais significativa nos canais T4, F8 e F7, onde as densidades atingem valores próximos a 80%.

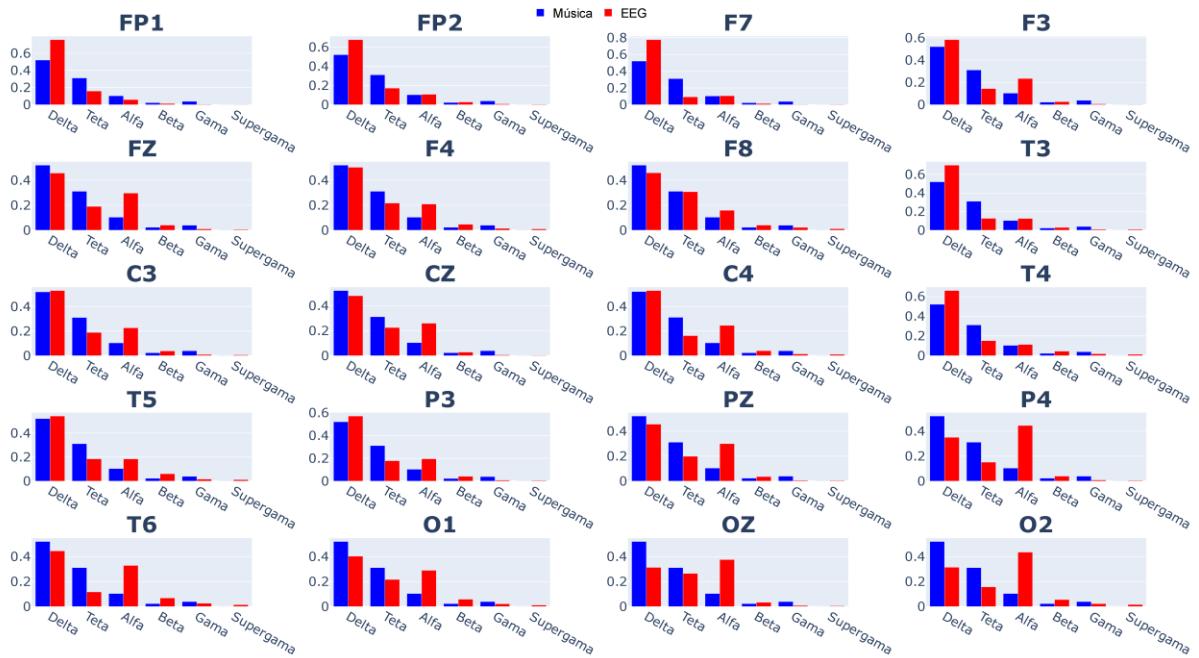
Nos canais occipitais e parietais, observa-se um aumento da densidade na banda Alfa, contrastando com a predominância da banda Delta observada no trecho anterior (63 a 65 segundos). Embora a banda Alfa predomine nesses canais, essa predominância é menos evidente que no trecho 1 (30 a 32 segundos), onde as densidades variaram entre 70% e 80%. No trecho atual, a densidade da banda Alfa oscila entre 50% e 40%, enquanto a banda Delta apresenta valores entre 20% e 40%.

A comparação ilustrada revela que, neste trecho, a densidade espectral da música exibe um decaimento com o aumento das frequências, refletindo uma predominância de baixas frequências. Paralelamente, verifica-se um aumento significativo na correlação positiva entre o EEG e o estímulo musical em todos os canais. Essa correlação positiva é particularmente notável nos canais frontais, temporais e centrais, que exibem comportamentos semelhantes ao do áudio. Nos canais occipitais e parietais, o aumento da banda Alfa introduz uma interrupção

nessa correlação positiva, embora essa interrupção não comprometa de forma considerável o padrão geral observado.

A Figura 9 apresenta a comparação das densidades espetrais do EEG e do estímulo musical referente ao trecho de 90 a 92 segundos.

Figura 9 – Comparação das densidades espetrais do EEG e do estímulo musical no trecho de 90 a 92 segundos



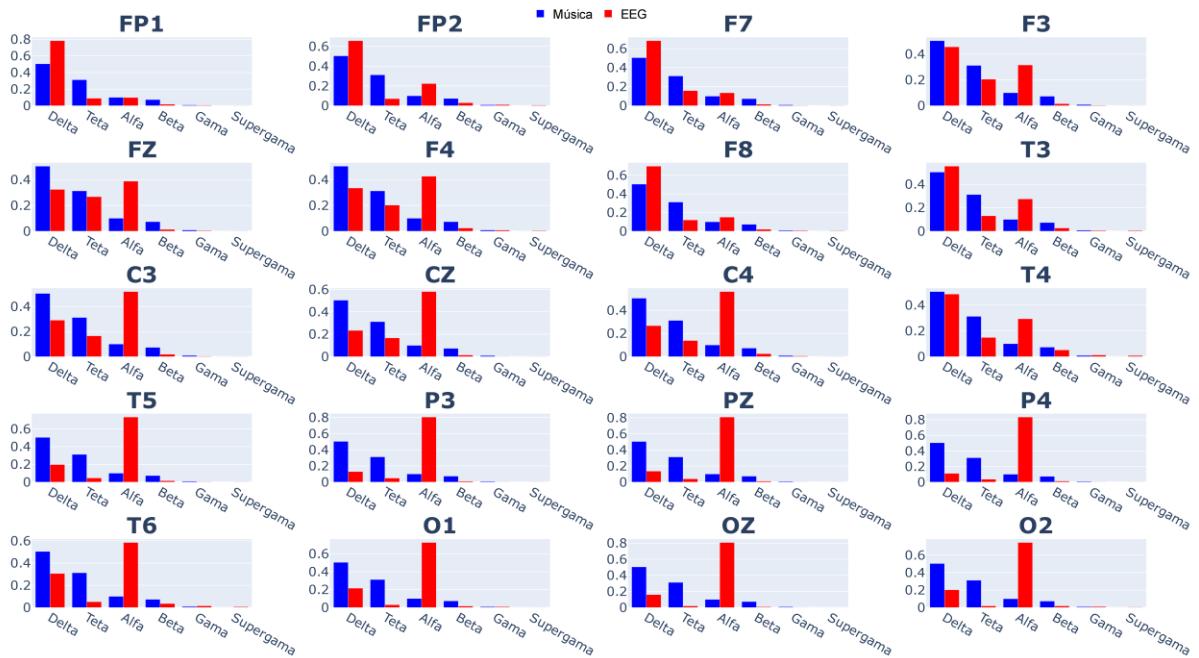
Fonte: O autor

Aos 90 segundos, é possível observar que o comportamento da densidade musical permaneceu semelhante ao tempo anterior, com isso permanece evidente uma continuidade na correlação positiva em praticamente todos os canais, ressalta-se assim como nos tempos anteriores uma correlação positiva bastante semelhante a densidade musical nos canais frontais, em especial FP1 e FP2.

Os canais occipitais e parietais analisados anteriormente, onde havia uma predominância na banda Alfa, aqui essa predominância se encontra com menos intensidade, similarizando mais com as densidades Delta, ajudando assim, a manter uma correlação positiva entre esses canais de EEG e o áudio de estimulação.

E por fim a Figura 10 apresenta a comparação das densidades espetrais do EEG e do estímulo musical referente ao trecho de 106 a 108 segundos.

Figura 10 – Comparaçao das densidades espectralas do EEG e do estímulo musical no trecho de 106 a 108 segundos



Fonte: O autor

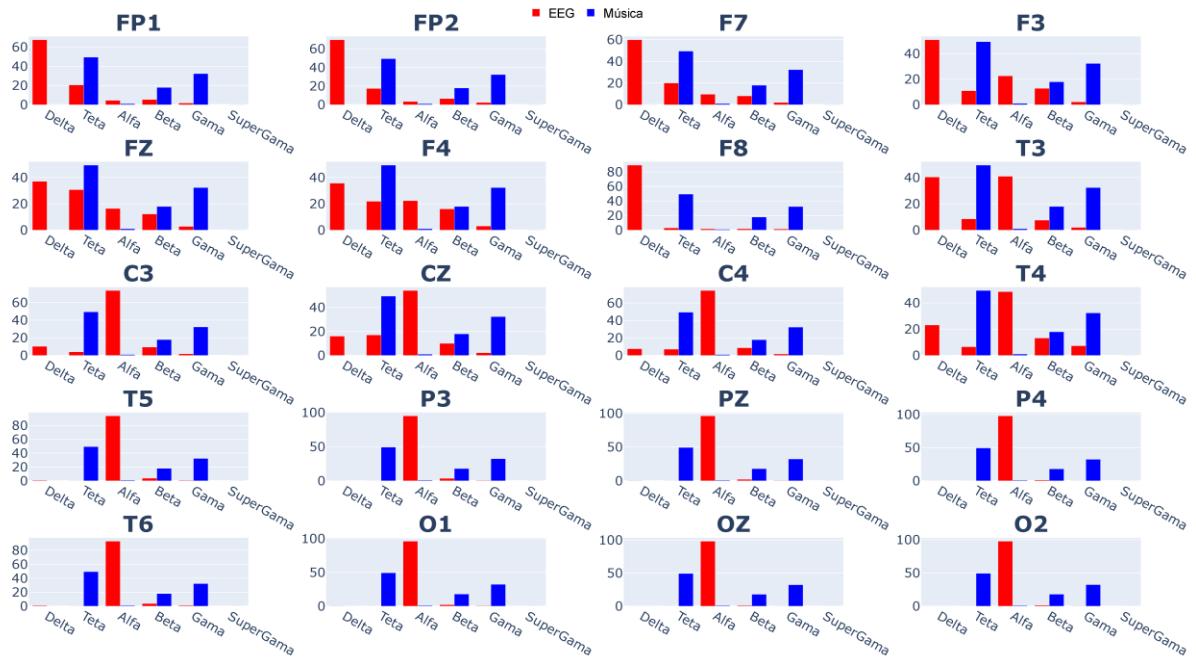
No trecho final de análise, de 106 a 108 segundos, a Figura 10 indica que, apesar das densidades espectralas do estímulo musical se manterem semelhantes às dos dois trechos anteriores (63 a 65 segundos e 76 a 78 segundos), a correlação positiva observada anteriormente em praticamente todos os canais não se observa neste intervalo. Essa correlação positiva persiste apenas em canais frontais específicos, como FP1, F7 e F8, enquanto nos demais canais não se observa uma relação tão clara quanto nos trechos anteriores. Além disso, destaca-se a predominância da banda Alfa nos canais occipitais e parietais, que agora também se manifesta de forma significativa em canais centrais e T5, acompanhada por um aumento considerável dessa banda nos canais F4 e FZ.

4.4 COMPARAÇÃO DO PCP ENTRE O EEG E ÁUDIO

Com base na variabilidade observada nas DEP e na correlação entre EEG e estímulo musical, optou-se por aplicar o Percentual de Contribuição de Potência (PCP) nos trechos de 30 a 32 segundos e 76 a 78 segundos. Optou-se por esses intervalos por representarem extremos funcionais ao longo da estimulação musical: o primeiro, marcado por baixa correlação e predominância de banda Alfa, refletindo um estado inicial de adaptação; o segundo, associado à máxima correlação espectral entre EEG e música, indicando um possível pico de imersão

auditiva. Essa escolha estratégica visa explorar com maior profundidade os mecanismos temporais de sincronização entre estímulo sonoro e atividade cerebral.

Figura 11 – Comparação do PCP do EEG e do estímulo musical no trecho de 30 a 32 segundos



Fonte: O autor

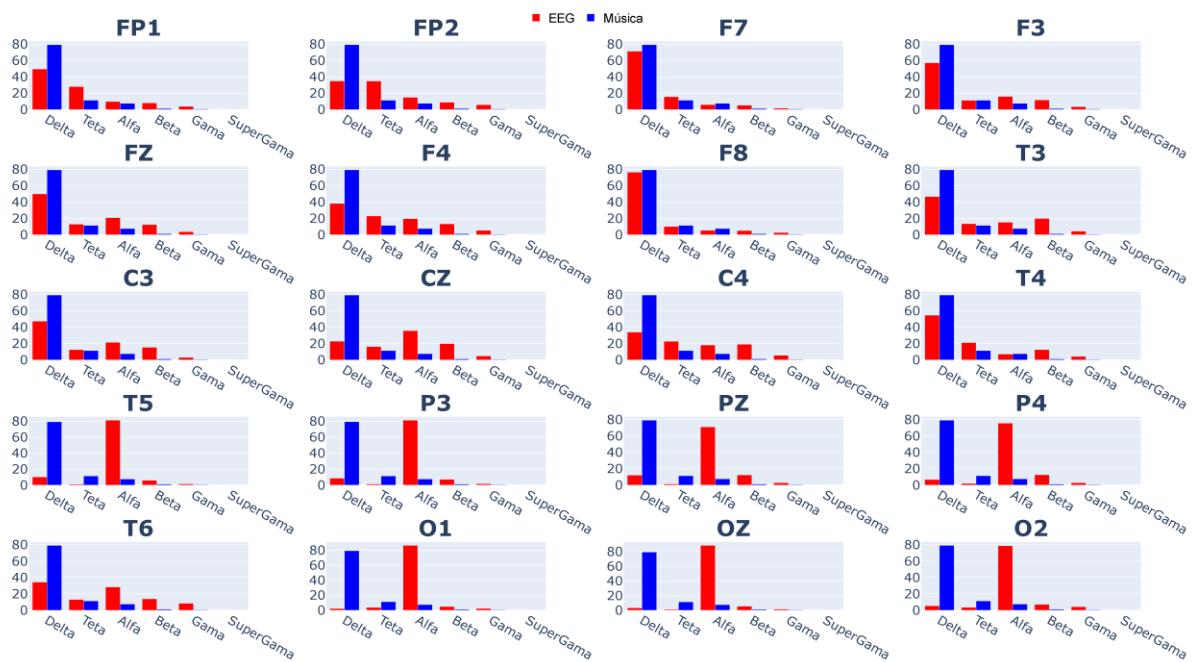
Analisando a Figura 11, observa-se que o PCP da música se manteve semelhante ao padrão previamente identificado na análise de DEP. Os valores de PCP concentraram-se principalmente nas bandas Teta, Gama e Beta, com a banda Teta apresentando a maior contribuição de potência, em torno de 50%. A banda Gama surge como a segunda mais expressiva, seguida pela Beta. A banda Alfa apresentou contribuição reduzida em relação às demais, enquanto as bandas Delta e Supergama foram as que exibiram os menores valores de PCP.

No EEG, a análise por regiões revela que a região frontal apresentou os maiores valores de PCP na banda Delta, variando entre 40% e 70%, com destaque para canais como F8, que exibiram quedas acentuadas na potência das bandas subsequentes de aproximadamente 80% na Delta para menos de 10% nas demais frequências.

Nas demais regiões (occipital, central, parietal e temporal), nota-se uma predominância expressiva da banda Alfa, com canais occipitais e parietais apresentando contribuições superiores a 90% nesta faixa.

Assim, ao comparar os perfis de potência do áudio e do EEG por meio do PCP, constata-se que, no trecho 30–32 s analisado, não se observa correlação positiva ou negativa evidente entre os sinais. As discrepâncias entre os padrões de distribuição espectral da música e da atividade cerebral permanecem, corroborando os achados obtidos previamente com a análise de DEP.

Figura 12 – Comparação do PCP do EEG e do estímulo musical no trecho de 76 a 78 segundos



Fonte: O autor

No trecho de 76 a 78 segundos de estimulação, observado na Figura 12, observa-se que o PCP do áudio apresentou predominância marcante na banda Delta, com contribuição de aproximadamente 79%. As bandas subsequentes exibiram um decaimento expressivo, com a banda Teta contribuindo com cerca de 10%, e as demais bandas mantendo esse padrão de redução progressiva.

Ao analisar os canais de EEG, nota-se predominância da banda Delta nas regiões frontais, centrais e nos canais T3 e T4, com exceção dos canais FP2 e Cz, que não seguiram esse padrão. Nos canais com predominância Delta, o padrão de decaimento espectral também se manteve, sendo mais abrupto em alguns canais (F7, F3 e F8) e mais gradual em outros (FP1 e F4).

Em contrapartida, os canais occipitais, parietais e o canal T5 apresentaram um comportamento distinto, com clara predominância da banda Alfa, atingindo contribuições em torno de 80% em todos esses canais.

Ao comparar os perfis espectrais de áudio e EEG neste trecho, verifica-se uma forte correlação positiva nas regiões frontais, centrais e nos canais T3 e T4, justamente onde a banda Delta foi dominante em ambos os sinais, e o padrão de decaimento entre bandas foi preservado.

Por outro lado, nos canais com predominância de Alfa (occipitais, parietais e T5), não se observou uma correspondência evidente com o perfil espectral do áudio, sugerindo ausência de correlação significativa nessas regiões para o intervalo analisado.

5 DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta as discussões encontradas a partir dos resultados apresentados no presente trabalho. A discussão está organizada por métricas e abordagens empregadas, de modo a permitir uma compreensão mais aprofundada das implicações dos resultados no contexto da interação entre estímulos musicais e atividade elétrica cerebral.

5.1 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (DEP)

A análise dos resultados obtidos neste estudo permite explorar a relação entre os sinais de eletroencefalograma (EEG) e o estímulo musical, considerando a adaptação espectral do áudio e a evolução temporal das densidades espetrais nos trechos analisados (30–32 s, 63–65 s, 76–78 s, 90–92 s, 106–108 s). Os achados revelam padrões de modulação cortical influenciados pela música, com destaque para as bandas de frequência Delta e Alfa, sobre a interação entre estimulação auditiva e atividade cerebral.

A elevada taxa de amostragem do áudio utilizado (48.000 Hz) permitiu captar uma ampla gama de frequências, embora o conteúdo espectral mais expressivo tenha se concentrado abaixo de 2.000 Hz. Essa característica possibilitou a definição de bandas análogas às faixas de EEG (Delta, Teta, Alfa, Beta, Gama e Supergama), com larguras coerentes e sem espaçamentos excessivos, favorecendo uma análise temporal estruturada da distribuição espectral da música. Essa adaptação espectral foi fundamental para investigar a correlação entre os sinais de EEG e o estímulo musical.

De modo geral, observou-se que a predominância de frequências mais baixas na música, especialmente na faixa Delta, esteve associada a correlações positivas mais intensas com o EEG. Tal padrão foi evidente na comparação entre os trechos iniciais (30–32 s e 63–65 s), que apresentaram correlações baixas ou negativas, e os momentos intermediários (76–78 s e 90–92 s), nos quais a correlação se intensificou consideravelmente. Esse predomínio das baixas frequências na correlação positiva também encontra respaldo no estudo de (WEINECK, WEN, *et al.*, 2022) que observaram maior sincronização neural com músicas de tempos lentos (1–2 Hz), especialmente quando o processamento envolvia atributos espetrais como o fluxo espectral. Tal achado sugere que a previsibilidade e a riqueza de variação espectral em baixas frequências podem favorecer o acoplamento entre o estímulo musical e a atividade cortical.

Entretanto, essa tendência não se manteve de forma linear ao longo de toda a exposição. No último trecho analisado (106–108 s), apesar da densidade espectral da música permanecer semelhante à dos trechos anteriores, a correlação positiva foi significativamente reduzida. Esse

declínio pode estar relacionado ao aumento expressivo da atividade na banda Alfa nos canais de EEG, especialmente em regiões occipitais, parietais, centrais e no canal T5. Ainda que a correlação tenha diminuído, o trecho final manteve uma correspondência de densidade superior à dos instantes iniciais, sugerindo possível efeito acumulado do tempo de exposição.

A literatura corrobora esses achados, indicando que estados meditativos ou de relaxamento prolongado estão associados ao aumento da potência na banda Alfa, sobretudo em regiões posteriores do cérebro, em detrimento das áreas frontais e centrais (LOUREIRO DE S. COSTA, L. DE O. TOUTAIN, *et al.*, 2020). No presente estudo, a modulação da atividade Alfa foi notável ao longo da estimulação musical. No primeiro segmento (30–32 s), a banda Alfa apresentou-se fortemente nas regiões occipitais e parietais, sugerindo um estado inicial de relaxamento com os olhos fechados. Essa intensidade diminuiu nos trechos intermediários (63–65 s e 76–78 s), coincidindo com o aumento da correlação positiva entre EEG e estímulo sonoro. No trecho final (106–108 s), a dominância da banda Alfa ressurgiu de forma robusta, expandindo-se para canais centrais e temporais (T5), o que pode indicar um retorno a um estado de repouso profundo ou imersão introspectiva.

Essa oscilação na potência Alfa pode estar relacionada ao processo de imersão musical. Inicialmente, o engajamento atencional com a música possivelmente supriu a atividade Alfa de repouso, efeito descrito por (KLIMESCH, 1999) que associou a supressão da banda Alfa à ativação cortical decorrente de tarefas sensoriais, como a atenção ao ouvir uma música. Resultados semelhantes aos do presente estudo também dialogam com as observações de (SCHAEFER, VLEK, *et al.*, 2011a), que demonstraram que a atividade Alfa é modulada pela direção do foco atencional, ou seja, mais intensa em estados de foco interno, como a imaginação musical, e reduzida em condições de atenção externa, como na percepção ativa. Com o prolongamento da exposição, a familiaridade com o estímulo e um aprofundamento da imersão podem ter conduzido a um estado análogo à meditação, culminando no retorno da atividade Alfa no final do experimento.

Adicionalmente, o tempo de exposição à música parece desempenhar papel determinante na evolução da resposta cortical. Nos primeiros instantes (30–32 s), predominaram correlações negativas ou nulas, possivelmente refletindo uma resposta inicial de adaptação neural. À medida que a estimulação prosseguiu, a correlação positiva evoluiu, sugerindo um fortalecimento do envolvimento cortical, possivelmente mediado por processos de habituação, foco atencional ou modulação emocional. Apesar da queda observada no trecho final, a semelhança espectral com os momentos intermediários, aliada à dominância da banda

Alfa, sugere que efeitos acumulativos de exposição prolongada à música podem modular dinamicamente a conectividade e a sincronização cortical.

5.2 PERCENTUAL DE CONTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA (PCP)

A análise do PCP complementa os resultados obtidos com a densidade espectral (Seção 5.1), reforçando a identificação de padrões regionais e temporais na resposta cortical. Ambos os quantificadores indicam que a correlação entre o estímulo musical e a atividade elétrica cerebral foi mais evidente no trecho de 76 a 78 segundos, especialmente nas regiões frontais e temporais, onde se observou predominância da banda Delta. No entanto, o PCP oferece uma perspectiva distinta ao quantificar a contribuição relativa de cada banda de frequência, permitindo uma interpretação direta da distribuição percentual da energia espectral em diferentes regiões cerebrais.

Observou-se, por meio do PCP, que o estado de relaxamento associado à predominância da banda Alfa foi extremamente marcado no primeiro trecho de estimulação (30–32 s), abrangendo praticamente todas as regiões cerebrais. Em especial, os canais occipitais e parietais apresentaram contribuições superiores a 90% nessa banda, reforçando a hipótese de um estado meditativo inicial.

Já no trecho de 76 a 78 segundos, essa predominância Alfa foi significativamente reduzida, sobretudo nas regiões centrais e temporais, revelando uma redistribuição da energia espectral. Tal padrão corrobora a discussão apresentada na Seção 5.1, que sugere que, com o avanço da estimulação musical, houve uma diminuição do estado meditativo inicial, possivelmente em função da habituação ao estímulo, do aumento do foco auditivo e do envolvimento progressivo com o conteúdo musical.

A utilização do PCP, portanto, não apenas confirmou a tendência observada nas densidades espetrais, como também facilitou a identificação de transições no estado cortical ao longo do tempo, permitindo uma leitura mais quantitativa da dinâmica cerebral frente à música.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo investigar a interação entre os sinais de EEG e o estímulo musical, por meio da análise espectral em diferentes trechos temporais de exposição musical. A partir da adaptação das bandas de frequência do áudio às faixas típicas do EEG, foi possível estabelecer uma base comum para a comparação entre os domínios espectrais de ambos os sinais, favorecendo uma análise mais coerente da modulação cerebral diante da música.

Os resultados obtidos evidenciam que a correlação entre EEG e música varia ao longo do tempo de estimulação, sendo influenciada principalmente pela duração da exposição e pela predominância de baixas frequências no áudio, nas quais se observou a maior presença de correlações positivas. Observou-se que trechos intermediários, como o de 76 a 78 segundos, apresentaram as maiores correlações positivas, enquanto os momentos iniciais (30–32 s) e finais (106–108 s) revelaram padrões distintos, marcados por uma dominância expressiva da banda Alfa em regiões posteriores, característica associada a estados de relaxamento ou introspecção. Esses achados indicam que o envolvimento cerebral com o estímulo musical pode evoluir progressivamente, refletindo processos como habituação, atenção seletiva e imersão auditiva.

A análise através da DEP e do PCP demonstrou-se eficaz na identificação de padrões regionais e temporais da atividade cerebral, permitindo não apenas observar a intensidade das frequências, mas também compreender a distribuição proporcional da potência por banda em cada região. Essa abordagem complementar revelou-se sensível a variações sutis no comportamento cortical e contribuiu para uma interpretação mais robusta dos dados.

Apesar dos avanços alcançados na análise da interação entre sinais eletroencefalográficos e estímulos musicais, este estudo apresenta algumas limitações que devem ser reconhecidas para a adequada contextualização dos resultados.

Uma das principais limitações está relacionada ao tamanho amostral reduzido, o que restringe a generalização dos achados para diferentes perfis populacionais. Além disso, o caráter subjetivo da escolha musical, ainda que relevante para o engajamento emocional do participante, introduz variabilidades que podem dificultar a padronização dos estímulos e a comparação entre sujeitos.

Um outro limitante se dá pela análise comparativa unicamente visual dos gráficos de DEP e PCP mostrados no capítulo 4.3 e 4.4, respectivamente. Os gráficos apesar de mostrarem uma representação clara do comportamento dos quantificadores analisados ainda carece um quantificador específico para a análise de correlação positiva/negativa que foi apresentado durante este trabalho.

Diante dessas limitações, futuras investigações poderiam ampliar a base amostral, introduzir músicas padronizadas com controle de variáveis acústicas, além da inclusão de uma visão analítica específica para a análise de correlação, como a correlação de Spearman (uma medida estatística que avalia a relação entre duas variáveis, indicando a força e a direção da associação). A exploração desses dados representa uma importante continuação, podendo revelar distintas modulações da atividade cerebral em resposta a diferentes estados cognitivos e emocionais.

Embora ainda existem muitos aspectos a serem explorados, este estudo contribui de maneira significativa para a compreensão dos efeitos da música sobre a atividade elétrica cerebral, oferecendo caminhos promissores para novas investigações no campo da neurociência aplicada à música e à engenharia biomédica.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, L. M. de S., SILVA, U. P. da, HARTMANN, C., *et al.* "O poder da música para a saúde sob a luz da neurociência", **COGNITIONIS Scientific Journal**, v. 7, n. 2, p. e424, 9 jul. 2024. DOI: 10.38087/2595.8801.424. .

BEPPI, C., RIBEIRO VIOLANTE, I., SCOTT, G., *et al.* "EEG, MEG and neuromodulatory approaches to explore cognition: Current status and future directions", **Brain and Cognition**, v. 148, p. 105677, 1 mar. 2021. DOI: 10.1016/J.BANDC.2020.105677. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278262620302803>. Acesso em: 4 ago. 2025.

BERNARDI, G., BETTA, M., RICCIARDI, E., *et al.* "Regional Delta Waves In Human Rapid Eye Movement Sleep", **The Journal of Neuroscience**, v. 39, n. 14, p. 2686, 3 abr. 2019. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2298-18.2019. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6445986/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DENG, Q., WU, C., PARKER, E., *et al.* "Mystery of gamma wave stimulation in brain disorders", **Molecular Neurodegeneration** 2024 **19:1**, v. 19, n. 1, p. 1–23, 18 dez. 2024. DOI: 10.1186/S13024-024-00785-X. Disponível em: <https://molecularneurodegeneration.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13024-024-00785-x>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DOELLING, K. B., POEPPEL, D. "Cortical entrainment to music and its modulation by expertise", **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 45, p. E6233–E6242, 10 nov. 2015. DOI: 10.1073/PNAS.1508431112/SUPPL_FILE/PNAS.201508431SI.PDF. Disponível em: [/doi/pdf/10.1073/pnas.1508431112?download=true](https://doi/pdf/10.1073/pnas.1508431112?download=true). Acesso em: 4 ago. 2025.

DONALD L. SCHOMER, FERNANDO H. LOPES DA SILVA. "Niedermeyer's Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields", **Case Studies in Clinical Psychological Science: Bridging the Gap from Science to Practice**, n. August, p. 1–7, 1 nov. 2017. DOI: 10.1093/MED/9780190228484.001.0001. Disponível em: <https://academic.oup.com/book/35515>. Acesso em: 4 ago. 2025.

DOS ANJOS, T., DI RIENZO, F., BENOIT, C. E., *et al.* "Brain wave modulation and EEG power changes during auditory beats stimulation", **Neuroscience**, v. 554, p. 156–166, 30 ago. 2024. DOI: 10.1016/J.NEUROSCIENCE.2024.07.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030645222400321X>. Acesso em: 22 jun. 2025.

FACHNER, J. C., MAIDHOF, C., GROCKE, D., *et al.* "“Telling me not to worry...” Hyperscanning and Neural Dynamics of Emotion Processing During Guided Imagery and Music", **Frontiers in Psychology**, v. 10, p. 452040, 25 jul. 2019. DOI: 10.3389/FPSYG.2019.01561/BIBTEX. Disponível em: www.frontiersin.org. Acesso em: 5 ago. 2025.

GAVARET, M., IFTIMOVICI, A., PRUVOST-ROBIEUX, E. "EEG: Current relevance and promising quantitative analyses", **Revue Neurologique**, v. 179, n. 4, p. 352–360, 1 abr. 2023. DOI: 10.1016/J.NEUROL.2022.12.008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003537872300869X?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 6 ago. 2025.

HANS BERGER, V. "Über das Elektrenkephalogramm des Menschen", **Organismus**. S, 1929. . Acesso em: 6 ago. 2025.

HERWIG, U., SATRAPI, P., SCHÖNFELDT-LECUONA, C. "Using the international 10-20 EEG system for positioning of transcranial magnetic stimulation", **SpringerU Herwig, P Satrapı, C Schönfeldt-Lecuona****Brain topography**, 2003•Springer, v. 16, n. 2, p. 95–99, dez. 2003. DOI: 10.1023/B:BRAT.0000006333.93597.9D. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/b:brat.0000006333.93597.9d>. Acesso em: 7 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022 - Religiões**. . Rio de Janeiro, [s.n.], 2025. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102182.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2025.

KATYAL, S., GOLDIN, P. "Alpha and theta oscillations are inversely related to progressive levels of meditation depth", **Neuroscience of Consciousness**, v. 2021, n. 1, p. niab042, 2021.

DOI: 10.1093/NC/NIAB042. Disponível em: <https://PMC8633885/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

KLEM, G., LÜDERS, H., JASPER, H., *et al.* "The ten-twenty electrode system of the International Federation. The International Federation of Clinical Neurophysiology.", **Electroencephalography and clinical neurophysiology. Supplement**, 1999. . Acesso em: 4 ago. 2025.

KLIMESCH, W. "EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis", **Brain Research Reviews**, v. 29, n. 2–3, p. 169–195, 1 abr. 1999. DOI: 10.1016/S0165-0173(98)00056-3. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165017398000563>. Acesso em: 30 jul. 2025.

KOELSCH, S. "Brain correlates of music-evoked emotions", **Nature Reviews Neuroscience**, v. 15, n. 3, p. 170–180, mar. 2014. DOI: 10.1038/NRN3666,. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24552785/>. Acesso em: 5 ago. 2025.

LA VAQUE, T. J. "The History of EEG Hans Berger", **Journal of Neurotherapy**, v. 3, n. 2, p. 1–9, 1999. DOI: 10.1300/J184V03N02_01. Disponível em: <https://isnr-jnt.org/article/view/17220>. Acesso em: 4 ago. 2025.

LOUREIRO DE S. COSTA, N., L. DE O. TOUTAIN, T. G., GARCIA V. MIRANDA, J., *et al.* "Frequência Alfa na meditação Gurdjieff", 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cmbio/article/view/42666/24178>. Acesso em: 28 jul. 2025.

LUDOVICO MAXIMIANO BARBOSA, J., ALICE CARVALHO DE OLIVEIRA MAGALHÃES, K., BATISTA DESTRO FILHO, J. "ESTUDO COMPARATIVO DO PROCESSAMENTO DE SINAIS BIOMÉDICO ATRAVÉS DE DUAS PLATAFORMAS COMPARATIVE STUDY OF PROCESSING OF BIOMEDICAL SIGNS THROUGH TWO PLATFORMS", 2020. . Acesso em: 10 ago. 2025.

NOZARADAN, S., MOURAUX, A., JONAS, J., *et al.* "Intracerebral evidence of rhythm transform in the human auditory cortex", **Brain Structure and Function**, v. 222, n. 5, p. 2389–

2404, 1 jul. 2017. DOI: 10.1007/S00429-016-1348-0,. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27990557/>. Acesso em: 7 ago. 2025.

RAMOS, C. D. "Caracterização do eletroencefalograma normal em situação de vigília: elaboração da base de dados e análise quantitativa", 25 jul. 2017. DOI: 10.14393/UFU.DI.2017.574. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19571>. Acesso em: 27 jul. 2025.

SCHAEFER, R. S., VLEK, R. J., DESAIN, P. "Music perception and imagery in EEG: Alpha band effects of task and stimulus", **International Journal of Psychophysiology**, v. 82, n. 3, p. 254–259, dez. 2011a. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2011.09.007. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21945480/>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SCHAEFER, R. S., VLEK, R. J., DESAIN, P. "Music perception and imagery in EEG: Alpha band effects of task and stimulus", **International Journal of Psychophysiology**, v. 82, n. 3, p. 254–259, 1 dez. 2011b. DOI: 10.1016/J.IJPSYCHO.2011.09.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016787601100273X?via%3Dihub>. Acesso em: 7 ago. 2025.

SEECK, M., KOESSLER, L., BAST, T., *et al.* "The standardized EEG electrode array of the IFCN", **Clinical Neurophysiology**, v. 128, n. 10, p. 2070–2077, 1 out. 2017. DOI: 10.1016/J.CLINPH.2017.06.254. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388245717304832#b0095>. Acesso em: 4 ago. 2025.

STONE, J. L., HUGHES, J. R. "Early history of electroencephalography and establishment of the american clinical neurophysiology society", **Journal of Clinical Neurophysiology**, v. 30, n. 1, p. 28–44, fev. 2013. DOI: 10.1097/WNP.0B013E31827EDB2D. Disponível em: https://journals.lww.com/clinicalneurophys/fulltext/2013/02000/early_history_of_electroencephalography_and.2.aspx. Acesso em: 4 ago. 2025.

T. ZAATAR, M., ALHAKIM, K., ENAYEH, M., *et al.* "The transformative power of music: Insights into neuroplasticity, health, and disease", **Brain, Behavior, & Immunity - Health**, v. 35, p. 100716, 1 fev. 2024. DOI: 10.1016/J.BBIH.2023.100716. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666354623001308>. Acesso em: 4 ago. 2025.

WEINECK, K., WEN, O. X., HENRY, M. J. "Neural synchronization is strongest to the spectral flux of slow music and depends on familiarity and beat salience", **eLife**, v. 11, 2022. DOI: 10.7554/ELIFE.75515. . Acesso em: 7 ago. 2025.

WELCH, P. D. "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms", **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901. . Acesso em: 31 jul. 2025.

WIGRAM, Tony., PEDERSEN, I. Nygaard., BONDE, L. Ole. **A comprehensive guide to music therapy : theory, clinical practice, research, and training**. [S.l.], Jessica Kingsley Publishers, 2002. v. 1. Disponível em: https://books.google.com/books/about/A_Comprehensive_Guide_to_Music_Therapy.html?hl=pt-BR&id=K_Ri0-e0K0EC. Acesso em: 5 ago. 2025.

YANG, Z., SU, Q., XIE, J., et al. "Music tempo modulates emotional states as revealed through EEG insights", **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, 1 dez. 2025. DOI: 10.1038/S41598-025-92679-1,. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40065030/>. Acesso em: 5 ago. 2025.

ZATORREA, R. J., SALIMPOOR, V. N. "From perception to pleasure: Music and its neural substrates", **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. SUPPL2, p. 10430–10437, 18 jun. 2013. DOI: 10.1073/PNAS.1301228110,. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1301228110>. Acesso em: 5 ago. 2025.

ZHANG, H., ZHOU, Q. Q., CHEN, H., et al. "The applied principles of EEG analysis methods in neuroscience and clinical neurology", **Military Medical Research 2023 10:1**, v. 10, n. 1, p. 1–40, 19 dez. 2023. DOI: 10.1186/S40779-023-00502-7. Disponível em: <https://mmrjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40779-023-00502-7>. Acesso em: 6 ago. 2025.

ZHANG, N., LIU, C., WANG, W., *et al.* "A review of EEG signals in the acoustic environment: Brain rhythm, emotion, performance, and restorative intervention", **Applied Acoustics**, v. 230, p. 110418, 15 fev. 2025. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2024.110418. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X24005693#b0010>. Acesso em: 4 ago. 2025.

ANEXO A ENTREVISTA INICIAL COM VOLUNTÁRIO



UFU – Universidade Federal de Uberlândia

FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica BioLab – Labor. de Engenharia Biomédica
Av. João Naves de Ávila, 2121 – Santa Mônica 38400-902 – Uberlândia MG

FICHA DE DADOS MUSICOTERAPIOS

Data da entrevista

Código do responsável Código do paciente:

_____UTI _____.	_____._____(anoUTI)mes.dia. leito)
_____cont_____.	_____._____(ano, contr, dia,)

Data de nascimento:

Idade:

Naturalidade:

Gênero:

Cor:

Altura:

Peso:

Escolaridade:

Religião:

Profissão:

Bairro e cidade de residência:

Estado:

Email:

Pessoas que residem com o paciente (apenas o grau de parentesco):

Possui alguma dificuldade auditiva? Qual?

Com que mão escreve preferencialmente?

() esquerda (canhoto) () direita (destro) () as duas (ambidestro)

Possui: ()TV ()Rádio ()Aparelho de som ()Celular ()Acesso a Internet ()MP3 ()TV a Cabo

Particularidades musicais: a) Quantas vezes por semana tem o hábito de ouvir música?

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7

b) Formação musical (conservatório, faculdade, aulas particulares):

c) Instrumentos musicais:

() não sabe tocar () toca por diversão () toca ou tocou profissionalmente

d) Instrumentos que toca:

e) Sons ou músicas agradáveis (estilos):

f) Sons ou músicas desagradáveis (estilos):

f) Preferências musicais: (ritmos, músicas – veja tabela ao final): g) Sons presentes no cotidiano:

h) Lembranças musicais da infância:

Sugestão de músicas do responsável para a execução durante o processo de estimulação musical:

Decisão final quanto às músicas a serem executadas concomitantes com a realização do EEG, em consonância com as orientações dos familiares e com a aprovação dos mesmos.

Estimulação 1:

Estimulação 2:

Estimulação 3:

Estimulação 4:

Estimulação 5:

Tabela –Estilos musicais ao 1

- | | |
|----------------------------|---|
| 01. _____ Música Erudita | 09. _____ Espirituais: gospel, silêncio |
| 02. _____ Blues | 10. _____ Alternativa |
| 03. _____ Country | 11. _____ Jazz |
| 04. _____ Dance/Eletrônica | 12. _____ Rock |
| 05. _____ MPB | 13. _____ Canto gregoriano |
| 06. _____ Rap/Hip-Hop | 14. _____ Heavy Metal |
| 07. _____ Soul/Funk | 15. _____ Músicas Folclóricas |
| 08. _____ Sertaneja | 16. _____ Músicas-tema de filmes |

PERGUNTAS ADICIONAIS

Qual a pessoa responsável pelo paciente que respondeu a esse questionário e qual seu grau de parentesco com o paciente?

O paciente prefere música instrumental ou música cantada? Brasileira ou internacional?

Critérios de exclusão:

ANEXO B ENTREVISTA PRIMEIRA ETAPA

Data da coleta:

Exame:

Voluntario:

Idade:

Música escolhida:

Meditação escolhida:

Protocolo:

Atividade	Tempo
Silencio	3 min
Musica Agradável	2 min
Pausa	1 min
Pre Meditação (própria da espiritualidade do voluntário)*	2 min
Meditação	5 min

*Atividade que o voluntario se reporte à sua espiritualidade

Registro:

Atividade	Tempo	Inicio	Fim	Tecla Inicio	Tecla Fim
Silencio	3min				
Música Agradável	2min				
Pausa	2min				
Pre Meditação	2min				
Meditação	5min				

Observações: Tecla inicio e tecla fim são as marcações mostradas no exame

Ocorrências:

Perguntas realizadas no momento da pausa (após a música)

- 1) De 1 a 5 quanto gostou da música?
- 2) De 1 a 5, sendo 1 sem efeito e 5 muito efeito, qual a escala de intensidade dessa música?
- 3) Qual sentimento essa música te proporcionou?