



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE FOTOSTIMULAÇÃO ALFA COM NEUROFEEDBACK POR EEG

Marcos Vinícios Andrade Silva¹ e Cláudio de Oliveira.¹

¹ Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, Brasil
(claudiodeoliveira@ufsj.edu.br)

Resumo: Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma de fotostimulação bilateral na faixa alfa, integrada ao EEG e ao neurofeedback, para futuras investigações sobre ansiedade. Nesta etapa, o sistema será construído e validado em cabeça-fantoma com sinais sintéticos. A proposta busca estabelecer bases físicas, neurocientíficas e de segurança para uma futura intervenção complementar, não farmacológica e experimental.

Palavras-chave: ritmo alfa; fotoestimulação; neurofeedback; ansiedade; eletroencefalografia.

INTRODUÇÃO

A eletroencefalografia, EEG, constitui uma técnica clássica de investigação não invasiva da atividade elétrica cerebral. Seus fundamentos remontam aos trabalhos pioneiros de Hans Berger, que demonstrou a possibilidade de registrar, na superfície do escalpo, diferenças de potencial associadas à atividade coletiva de populações neuronais. Entre os ritmos identificados, destaca-se o ritmo alfa, observado predominantemente entre 8 e 13 Hz nas regiões posteriores do cérebro, principalmente durante o repouso vigil com os olhos fechados (Berger, 1929). Sob a perspectiva da Física, os ritmos cerebrais podem ser estudados como oscilações coletivas produzidas por sistemas biológicos complexos. Frequência, amplitude, fase, potência e sincronização são grandezas fundamentais para a descrição desses sinais. As oscilações registradas pelo EEG não resultam da atividade de um único neurônio, mas da organização temporal de extensas redes neuronais distribuídas pelo encéfalo.

Embora tradicionalmente relacionado ao relaxamento e à redução da entrada visual, o ritmo alfa não representa ausência de atividade cerebral. Essa faixa de frequência está associada a mecanismos de organização temporal, controle inibitório, atenção seletiva e regulação do fluxo de informações entre diferentes regiões corticais. Sua amplitude e frequência dominante também podem variar entre indivíduos e de acordo com o estado fisiológico, a atenção e as condições experimentais (Klimesch et al., 2007).

O sistema visual constitui uma importante via de interação entre estímulos físicos externos e a atividade neural. A luz que atinge a retina é absorvida pelos fotorreceptores e convertida em sinais eletroquímicos. Esses sinais são processados

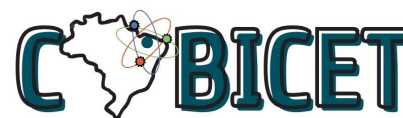
pelas diferentes camadas da retina e transmitidos pelas vias visuais até estruturas encefálicas, incluindo o tálamo e o córtex visual localizado na região occipital.

Quando a intensidade da luz varia periodicamente, o sistema visual é submetido a uma excitação temporal controlada. Nessas condições, o EEG pode apresentar componentes relacionadas à frequência do estímulo e aos seus harmônicos. Esse fenômeno é conhecido como condução fótica ou resposta visual evocada em regime permanente, frequentemente denominada *steady-state visual evoked potential*.

Os primeiros estudos sistemáticos demonstraram que a estimulação luminosa intermitente pode produzir respostas eletroencefalográficas associadas à frequência aplicada (Walter et al., 1946). Posteriormente, foram observados fenômenos de ressonância do córtex visual em diferentes regiões do espectro, incluindo frequências próximas à banda alfa (Herrmann, 2001).

Do ponto de vista dos sistemas oscilatórios, a fotoestimulação pode ser interpretada como uma excitação periódica externa aplicada a um sistema biológico que apresenta oscilações próprias. Dependendo da frequência, intensidade, duração e regularidade do estímulo, pode ocorrer interação entre a excitação luminosa e a dinâmica neural. Essa interação é frequentemente discutida por meio dos conceitos de sincronização, arrastamento ou *entrainment*.

Entretanto, a presença de um pico espectral na mesma frequência da estimulação não demonstra, isoladamente, que houve aumento de uma oscilação cerebral espontânea. O sinal observado pode resultar de uma resposta diretamente evocada pela repetição da luz, da sincronização de oscilações preexistentes ou da combinação entre esses mecanismos. Essa



distinção será essencial para a interpretação científica dos resultados futuros.

O neurofeedback acrescenta ao sistema um laço de realimentação. Nesse processo, uma característica do EEG é medida, processada e convertida em uma informação perceptível. A resposta pode ser visual, por meio de barras, cores ou imagens, ou sonora, por variações de intensidade e tonalidade. Dessa forma, uma variável fisiológica que normalmente não pode ser percebida diretamente torna-se observável em tempo real (Gruzelier, 2014).

A ansiedade, por sua vez, é um fenômeno complexo que envolve componentes emocionais, cognitivos, comportamentais e fisiológicos. Preocupação persistente, hipervigilância, tensão muscular, dificuldade de concentração, alterações do sono e respostas autonômicas podem estar presentes em diferentes manifestações da ansiedade. Portanto, esse estado não pode ser caracterizado apenas pela intensidade de uma única faixa do EEG.

Estudos experimentais têm investigado a possibilidade de utilização do neurofeedback como instrumento auxiliar em processos de autorregulação. Hou et al. (2021) observaram redução de medidas de ansiedade e de sintomas depressivos após treinamento de neurofeedback em pacientes com transtorno de ansiedade generalizada. Entretanto, o número reduzido de participantes e as diferenças metodológicas entre os protocolos ainda impedem conclusões clínicas definitivas.

Assim, a fotostimulação e o neurofeedback não são considerados, neste trabalho, substitutos da psicoterapia, do acompanhamento médico ou dos tratamentos farmacológicos estabelecidos. A hipótese de longo prazo consiste em investigar uma possível intervenção complementar, não farmacológica e experimental, cuja segurança e eficácia deverão ser avaliadas por estudos clínicos controlados.

A etapa atual do projeto é anterior à aplicação em seres humanos. Seu objetivo é desenvolver e validar uma plataforma capaz de produzir estímulos luminosos controlados, registrar sinais na faixa de microvolts, identificar componentes entre 8 e 13 Hz e gerar uma resposta de neurofeedback. A validação será realizada inicialmente em bancada, utilizando uma cabeça-fantoma e sinais sintéticos.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de fotoestimulação bilateral na faixa alfa, integrado à aquisição eletroencefalográfica e ao neurofeedback. Como perspectiva futura, pretende-se utilizar a plataforma em uma investigação interdisciplinar sobre ansiedade, envolvendo pesquisadores e profissionais das áreas de Física, Medicina, Neurologia, Psiquiatria, Psicologia, Oftalmologia e Neurociência.

MATERIAL E MÉTODOS

Delineamento do estudo

O estudo corresponde ao desenvolvimento e à validação instrumental de uma plataforma de fotoestimulação e neurofeedback. Nesta fase, não serão realizados procedimentos com voluntários, diagnósticos ou intervenções clínicas.

A plataforma será constituída por quatro elementos funcionais: sistema de fotoestimulação bilateral, cabeça-fantoma, aquisição eletroencefalográfica em quatro canais e processamento dos sinais com geração de neurofeedback.

Fotostimulação bilateral

O estímulo visual será produzido por uma fontes luminosa. O sistema permitirá controlar frequência, intensidade.

A faixa principal de operação será de 8 a 13 Hz. Também poderão ser utilizadas frequências próximas para caracterizar a resposta do sistema e realizar varreduras controladas.

A intensidade luminosa produzida por cada canal poderá ser representada por:

$$I(t) = I_0 + I_1 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

em que I_0 representa a intensidade luminosa média, I_1 corresponde à amplitude de modulação, f é a frequência, t é o tempo e ϕ representa a fase inicial.

A diferença de fase entre os canais permitirá produzir estímulos simultâneos, alternados ou defasados. Um sinal de sincronização será registrado juntamente com o EEG, indicando os instantes de início e término da estimulação.

Cabeça-fantoma e sinais sintéticos

A validação será realizada com uma cabeça-fantoma contendo um meio interno com propriedades condutivas controladas. Fontes internas produzirão sinais elétricos conhecidos, enquanto eletrodos posicionados na superfície realizarão a aquisição.

Serão utilizados sinais senoidais entre 8 e 13 Hz, interferência de 60 Hz, ruído de amplitude controlada e combinações de diferentes frequências. As amplitudes serão ajustadas para a ordem de microvolts, correspondente à escala característica dos sinais eletroencefalográficos.

A cabeça-fantoma permitirá comparar diretamente o sinal introduzido em seu interior com aquele medido na superfície. Esse procedimento possibilitará determinar sensibilidade, linearidade, resposta em frequência, estabilidade e repetibilidade da plataforma. A utilização de modelos dessa natureza é uma estratégia reconhecida para validação de equipamentos e técnicas de EEG (Collier et al., 2012).

Aquisição eletroencefalográfica

A aquisição será realizada em quatro canais correspondentes às posições O1, O2, P3 e P4 do sistema internacional 10–20 (Jasper, 1958). As posições occipitais estão diretamente relacionadas ao processamento visual, enquanto as posições parietais permitem acompanhar a distribuição posterior da atividade alfa.

Os sinais serão amplificados, condicionados e convertidos para o formato digital. A cadeia de aquisição deverá preservar as propriedades relevantes da forma de onda, principalmente amplitude, frequência, fase e evolução temporal.

Como os sinais de EEG apresentam amplitudes muito reduzidas, serão adotadas medidas de controle de ruído, aterramento, blindagem e rejeição de interferências. A caracterização metrológica deverá considerar que a resolução real do sistema depende não apenas do conversor utilizado, mas também do ruído eletrônico, da estabilidade da alimentação, dos eletrodos e das condições de montagem (Webster e Nimunkar, 2020).

Processamento dos sinais

Os sinais serão analisados nos domínios do tempo e da frequência. No domínio temporal serão observados a amplitude, a estabilidade, o atraso e a presença de sinais transitórios. No domínio da frequência será calculada a densidade espectral de potência.

A potência na faixa alfa será determinada pela integração da densidade espectral entre 8 e 13 Hz:

$$P_{\alpha} = \int_{8 \text{ Hz}}^{13 \text{ Hz}} S(f) df, \quad (2)$$

em que $S(f)$ representa a densidade espectral de potência do sinal.

Também será calculado um índice alfa relativo:

$$I_{\alpha} = \frac{P_{8-13 \text{ Hz}}}{P_{4-30 \text{ Hz}}}, \quad (3)$$

em que o numerador corresponde à potência na banda alfa e o denominador representa a potência em uma faixa espectral mais ampla.

A análise será realizada em janelas temporais sucessivas. Poderá ser aplicada uma média móvel para reduzir flutuações rápidas e produzir uma resposta de neurofeedback mais estável.

Neurofeedback

O índice alfa será convertido em uma resposta visual ou sonora. A saída visual poderá utilizar uma barra gráfica, mudança de cor ou variação de brilho. A saída sonora poderá empregar mudanças de intensidade ou tonalidade.

Na fase de bancada, o neurofeedback será avaliado por meio de sinais sintéticos. A amplitude de uma senoide de frequência conhecida será variada progressivamente, verificando-se se o indicador

acompanha essa alteração de maneira monotônica, estável e reprodutível.

O funcionamento será representado pelo seguinte fluxo:

sinal adquirido → análise espectral → índice alfa → resposta visual ou sonora.

Crítérios de validação

Serão avaliados:

- correspondência entre frequência aplicada e frequência medida;
- proporcionalidade entre amplitude aplicada e amplitude adquirida;
- relação sinal-ruído;
- capacidade de identificação da faixa alfa;
- atenuação da interferência de 60 Hz;
- repetibilidade entre canais e ciclos de medição;
- estabilidade temporal;
- atraso entre aquisição e neurofeedback;
- sincronização entre estímulo luminoso e registro.

Segurança e perspectiva clínica

A futura utilização com voluntários dependerá de aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa e da participação de equipe médica e multiprofissional.

A fotostimulação exige cuidado especial porque estímulos luminosos intermitentes podem provocar efeitos adversos em indivíduos suscetíveis. Frequência, intensidade, contraste, área do campo visual e duração da exposição deverão ser controlados. A triagem futura deverá considerar histórico de epilepsia, fotossensibilidade, enxaqueca provocada por luz e outras condições neurológicas relevantes (Fisher et al., 2026).

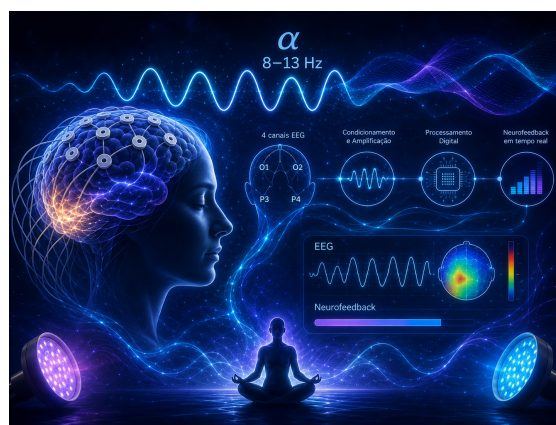


Figura 1. Representação conceitual do sistema de fotostimulação alfa, integrando estímulo visual bilateral, registro eletroencefalográfico nas regiões occipitais e parietais, análise da potência alfa e geração de neurofeedback em tempo real.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até o presente momento, foram definidos a arquitetura geral da plataforma, os parâmetros básicos de fotostimulação, as posições de registro do EEG e os critérios de validação instrumental.

A primeira etapa experimental será realizada pela aplicação de sinais conhecidos ao sistema de aquisição. Espera-se que uma senoide de 10 Hz produza um máximo espectral próximo dessa frequência. A diferença entre o valor aplicado e o valor medido permitirá avaliar a exatidão do processamento.

Posteriormente, os sinais serão introduzidos na cabeça-fantoma e adquiridos pelos eletrodos posicionados em sua superfície. A relação entre amplitude aplicada e amplitude medida permitirá avaliar a linearidade, enquanto a repetição dos ensaios fornecerá informações sobre estabilidade e reprodutibilidade.

A adição de uma componente de 60 Hz permitirá caracterizar a influência da rede elétrica e a eficiência dos procedimentos de atenuação. Ensaios com diferentes níveis de ruído serão utilizados para determinar o menor sinal alfa distinguível do fundo instrumental.

Do ponto de vista da Física, a plataforma permitirá estudar a resposta de um sistema biológico a uma excitação periódica externa. Frequência, fase, intensidade e duração serão variáveis controladas, enquanto amplitude, potência espectral, atraso e distribuição espacial constituirão grandezas observadas.

Na futura etapa com participantes, será necessário distinguir a resposta visual diretamente evocada de uma possível modulação das oscilações cerebrais espontâneas. Um pico de 10 Hz durante uma estimulação de 10 Hz pode representar apenas a resposta periódica do sistema visual. Portanto, essa observação não será suficiente para concluir que ocorreu relaxamento ou redução da ansiedade.

A utilização de quatro canais posteriores poderá permitir comparar respostas occipitais e parietais, fornecendo informações sobre a distribuição espacial da atividade relacionada ao estímulo. A diferença de fase entre as fontes luminosas também poderá fundamentar investigações sobre integração bilateral e organização temporal do processamento visual.

O neurofeedback será inicialmente considerado validado quando alterações controladas no sinal sintético produzirem respostas proporcionais e estáveis no indicador visual ou sonoro. Essa avaliação deverá preceder qualquer tentativa de treinamento com seres humanos.

Em uma etapa posterior, a plataforma poderá ser empregada para investigar possíveis relações entre fotostimulação, atividade alfa, relaxamento e autorregulação. Os resultados de Hou et al. (2021) sugerem que o neurofeedback alfa merece

investigação no contexto da ansiedade, mas não estabelecem eficácia clínica definitiva.

Futuros estudos deverão incluir escalas clínicas validadas, grupos de comparação, condições simuladas de estimulação, acompanhamento profissional e avaliação de possíveis efeitos adversos. A interpretação dos resultados deverá integrar medidas eletroencefalográficas, fisiológicas, psicológicas e clínicas.

A construção do equipamento representa, portanto, a etapa inicial de uma linha de pesquisa interdisciplinar. Sua validação fornecerá uma base objetiva para a definição de protocolos e para o estabelecimento de colaborações com profissionais das áreas médicas e biológicas.

CONCLUSÃO

O trabalho propõe uma plataforma para investigar as relações entre fotostimulação, ritmo alfa, processamento visual, neurofeedback e ansiedade. A etapa atual concentra-se na construção e validação do equipamento, utilizando cabeça-fantoma e sinais sintéticos.

A Física contribui com os conceitos de oscilação, frequência, fase, sincronização e análise espectral. A Biologia e a Neurociência fornecem a compreensão da retina, das vias visuais e das redes neurais. A Medicina e a Psicologia serão indispensáveis para a elaboração dos protocolos envolvendo voluntários e para a interpretação clínica dos resultados.

A validação instrumental deverá demonstrar que o sistema identifica corretamente sinais na faixa alfa e que o neurofeedback responde de maneira estável e proporcional. Somente após essa etapa poderão ser consideradas investigações com seres humanos.

Como perspectiva, pretende-se avaliar se a combinação entre fotostimulação alfa e neurofeedback pode contribuir como intervenção complementar, não invasiva e não farmacológica para pessoas com ansiedade. Essa hipótese deverá ser examinada por estudos controlados, aprovação ética e acompanhamento profissional.

O trabalho constitui um convite à colaboração de pesquisadores e profissionais da Medicina, Neurologia, Psiquiatria, Psicologia, Oftalmologia e Neurociência. A integração dessas áreas será necessária para transformar a plataforma tecnológica em um protocolo de pesquisa seguro, rigoroso e clinicamente relevante.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de São João del rei, pelo espaço físico.



REFERÊNCIAS

BERGER, H. Ueber das Elektroenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, v. 87, n. 1, p. 527–570, 1929.

COLLIER, T. J.; KYNOR, D. B.; BIESZCZAD, J.; AUDETTE, W. E.; KOBYLARZ, E. J.; DIAMOND, S. G. Creation of a human head phantom for testing of electroencephalography equipment and techniques. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 59, n. 9, p. 2628–2634, 2012.

FISHER, R. S. et al. Visually-provoked seizures: consensus of the Epilepsy Foundation Working Group. *Epilepsia*, v. 67, n. 2, p. 565–581, 2026.

GRUZELIER, J. H. EEG-neurofeedback for optimising performance. I: a review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, v. 44, p. 124–141, 2014.

HERRMANN, C. S. Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Experimental Brain Research*, v. 137, n. 3–4, p. 346–353, 2001.

HOU, Y.; ZHANG, S.; LI, N.; HUANG, Z.; WANG, L.; WANG, Y. Neurofeedback training improves anxiety trait and depressive symptom in GAD. *Brain and Behavior*, v. 11, n. 3, e02024, 2021.

JASPER, H. H. The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 10, p. 371–375, 1958.

KLIMESCH, W.; SAUSENG, P.; HANSLMAYR, S. EEG alpha oscillations: the inhibition-timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, v. 53, n. 1, p. 63–88, 2007.

WALTER, W. G.; DOVEY, V. J.; SHIPTON, H. Analysis of the electrical response of the human cortex to photic stimulation. *Nature*, v. 158, n. 4016, p. 540–541, 1946.

WEBSTER, J. G.; NIMUNKAR, A. J. (eds.). *Medical Instrumentation: Application and Design*. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.