



**FUNDAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS DA ATIVIDADE NEURONAL:
UMA ANÁLISE POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Eduardo Kauan Lee

Universidade Estadual Paulista - Campus Guaratinguetá (eduardo.lee@unesp.br)

Giovana Sano Rossi de Rezende

Universidade Estadual Paulista - Campus Guaratinguetá (gsr.rezende@unesp.br)

Luís Rodolfo Dos Santos Filho

Universidade Estadual Paulista - Campus Guaratinguetá (lr.santos@unesp.br)

CONTEXTUALIZAÇÃO: A aplicação de um modelo que integra duas áreas do conhecimento, biologia e física, oferece uma abordagem robusta para a identificação das fontes de atividade cerebral, partindo do princípio de que a atividade neuronal é fundamentalmente elétrica (KANDEL et al., 2021). O fluxo de íons através da membrana celular gera uma corrente elétrica, definida pela variação da carga no tempo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Como consequência, essa corrente inevitavelmente produz um campo magnético (B) no espaço, um fenômeno descrito pela Lei de Ampère — integrante das Equações de Maxwell. Essas equações formam a base do eletromagnetismo clássico, unificando eletricidade, magnetismo e óptica em um único conjunto teórico. Elas descrevem matematicamente como cargas elétricas geram campos elétricos, como correntes e campos variáveis produzem campos magnéticos e estabelecem que não existem monopolos magnéticos. Juntas, explicam a propagação das ondas eletromagnéticas, incluindo a luz, como oscilações acopladas dos campos elétrico e magnético no espaço. Para efetivamente modelar e quantificar este "produto intermediário" (o campo magnético), é necessário um modelo mais detalhado que leve em conta a geometria da fonte de corrente neural (BAILLET; MOSHER; LEAHY, 2001). A Lei de Biot-Savart fornece essa ferramenta, permitindo o cálculo da contribuição de cada elemento de corrente para o campo magnético em um ponto do espaço (GRIFFITHS, 2017). Assim, a Lei de Biot-Savart descreve como uma corrente elétrica gera um campo magnético em um ponto do espaço. Ela estabelece que cada elemento de corrente contribui para o campo magnético de forma proporcional à intensidade da corrente e inversamente

proporcional ao quadrado da distância até o ponto considerado. Matematicamente, permite calcular o vetor campo magnético resultante integrando as contribuições de todos os elementos de corrente de um condutor. Essa lei é fundamental para compreender fenômenos como o magnetismo em fios, bobinas e circuitos, e, no contexto biológico, para modelar o campo magnético gerado pelas correntes elétricas neurais, possibilitando a interpretação dos sinais cerebrais medidos por técnicas como a Magnetoencefalografia (MEG). Esse método é fundamentado no eletromagnetismo clássico, viabilizando a construção de um modelo computacional do subprocesso de geração de sinal, no qual as características da fonte se inter relacionam com o campo resultante. Com base na aplicação sinérgica dos princípios da neurociência e do eletromagnetismo, esta pesquisa visa evidenciar a relevância da modelagem computacional para a interpretação dos sinais de neuroimagem (DESTEXHE; SEJNOWSKI, 2001). A implementação de um modelo baseado nestas leis fundamentais contribuirá para uma avaliação mais precisa da origem da atividade cerebral e para a antecipação de como diferentes configurações neuronais se manifestam nos dados medidos, como por exemplo, em estudos de epileptiform (ALMEIDA et al., 2008). Dessa forma, a presente pesquisa busca aplicar os fundamentos do eletromagnetismo à modelagem da atividade cerebral, utilizando simulações computacionais como ferramenta para representar o problema direto — ou seja, a previsão dos sinais externos a partir de uma fonte neural conhecida.

OBJETIVO: Modelar a relação fundamental entre a atividade elétrica neuronal e o campo magnético cerebral por meio de um modelo computacional neurofísico do problema direto, aplicando os princípios do eletromagnetismo clássico. Especificamente, busca-se implementar o modelo computacional do problema direto para um dipolo de corrente neural utilizando a linguagem Python e os fundamentos da Lei de Biot-Savart; identificar como os parâmetros da fonte neural, como profundidade, orientação e intensidade da corrente, impactam as características do campo magnético simulado na superfície; e avaliar as implicações teóricas dessa modelagem para a interpretação dos sinais gerados em técnicas de neuroimagem, como a Magnetoencefalografia (MEG).

MÉTODO: O presente estudo adota uma abordagem quantitativa, teórico-computacional e descritiva, fundamentada nos princípios do eletromagnetismo e na modelagem matemática de fenômenos biofísicos. A pesquisa é dividida em três etapas principais: fundamentação teórica, desenvolvimento do modelo computacional e análise dos

resultados obtidos por simulação. Na primeira etapa, é realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente sobre os fundamentos da atividade neuronal e das leis físicas que regem os campos eletromagnéticos. Essa base teórica sustenta a formulação matemática do modelo, que descreve a propagação do campo magnético gerado por uma corrente iônica neuronal idealizada como um dipolo elétrico. Em seguida, é desenvolvido o modelo computacional do problema direto, no qual se calcula o campo magnético gerado por uma fonte de corrente conhecida. O código é implementado em Python, utilizando bibliotecas científicas como *NumPy* e *Matplotlib*, permitindo a visualização e a análise dos campos magnéticos em função dos parâmetros físicos da fonte. Por fim, realiza-se a análise quantitativa dos resultados das simulações, investigando como diferentes valores de intensidade, orientação e profundidade da fonte neural alteram o campo magnético resultante. Essa análise busca identificar padrões e relações causais que contribuam para o entendimento físico dos sinais medidos pela MEG.

RESULTADOS E DISCUSSÕES: Os resultados esperados indicam que a variação dos parâmetros da fonte neural (como intensidade e orientação da corrente) provoca mudanças diretas na magnitude e na direção do campo magnético resultante. Em especial, a simulação deve confirmar que fontes mais profundas produzem campos mais fracos na superfície, devido à dissipação espacial do campo magnético conforme o inverso do quadrado da distância, como previsto pela Lei de Biot-Savart. A análise das simulações permitirá compreender a relação causa-efeito entre a atividade elétrica neuronal e os sinais de MEG, oferecendo uma representação física e previsível dos fenômenos observados experimentalmente. Assim, a modelagem computacional torna-se uma ferramenta valiosa para validar interpretações de dados neurofisiológicos, reduzindo ambiguidades e ampliando a capacidade de previsão sobre o comportamento das correntes cerebrais. Além disso, o estudo reforça o papel da física como disciplina essencial para a neurociência moderna, pois demonstra que as leis fundamentais do eletromagnetismo são suficientes para explicar fenômenos complexos do cérebro humano quando devidamente aplicadas. A integração entre teoria, simulação e experimentação contribui para a consolidação de uma nova abordagem interdisciplinar: a neurofísica computacional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS: O presente projeto destina-se a fortalecer a capacidade de pesquisa dos alunos de graduação da UNESP e aprofundar o conhecimento sobre eletromagnetismo e suas aplicações em âmbitos interdisciplinares. O tema de pesquisa proposto é atual e tende a gerar resultados importantes na área de Física e Neurociência:

- 1) Melhorar a compreensão sobre correntes elétricas impulsionadas por neurônios; e 2)



identificar como essas correntes desenvolvem campos magnéticos, e suas aplicações para a física contemporânea. A área de pesquisa deste projeto, Modelagem e Simulação, encontra-se dentro de umas das grandes áreas da Engenharia, a Pesquisa Operacional.

PALAVRAS-CHAVE: Neurofísica, Modelagem Computacional, Magnetoencefalografia (MEG), Problema Direto, Lei de Biot-Savart.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. et al. Mechanistic hypotheses for nonsynaptic epileptiform activity induction and its transition from the interictal to ictal state—computational simulation. *Epilepsia*, v. 49, n. 11, p. 1908-1924, nov. 2008.

BAILLET, S. Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging. *Nature Neuroscience*, v. 20, n. 3, p. 327-339, mar. 2017.

BAILLET, S.; MOSHER, J. C.; LEAHY, R. M. Electromagnetic brain mapping. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 18, n. 6, p. 14-30, nov. 2001.

DESTEXHE, A.; SEJNOWSKI, T. J. Thalamocortical assemblies: computational properties and functional roles. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2001.

GRIFFITHS, D. J. Introduction to electrodynamics. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física, Volume 3: Eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HÄMÄLÄINEN, M. et al. Magnetoencephalography—theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of Modern Physics*, v. 65, n. 2, p. 413-497, abr. 1993.

KANDEL, E. R. et al. Principles of Neural Science. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2021.

LOPES DA SILVA, F. EEG and MEG: relevance to neuroscience. *Neuron*, v. 80, n. 5, p. 1112-1128, dez. 2013.

SCHOFFELEN, J.-M.; GROSS, J. Source connectivity analysis with MEG and EEG. *Human Brain Mapping*, v. 30, n. 6, p. 1857-1865, jun. 2009.

SORIANO, J. Neurophysics: Understanding brain activity with modeling complex systems mathematics. *Biophysica*, v. 3, n. 1, p. 181-202, 2023.

TARLACI, S.; PREGNOLATO, M. Quantum neurophysics: From non-living matter to quantum neurobiology and psychopathology. *International Journal of Psychophysiology*, v. 103, p. 1-13, mai. 2016.