Análise da influência de efeitos quânticos em canais iônicos associados ao potencial de ação neuronal

DE OLIVEIRA, Ana Beatriz[1,4]; DE CASTRO, Antônio Sérgio Magalhães[1,3,4]; BATISTA, Antonio Marcos[2,3,5]; BENTIVOGLIO, Lucas Eduardo[2,3,6]; TSUTSUI, Thiago Takaji[1,3]

Universidade Estadual de Ponta Grossa - QPQI Group - Brasil[1]
Universidade Estadual de Ponta Grossa - 105 Group - Brasil[2]
Universidade Estadual de Ponta Grossa - Programa de Pós-Graduação em Ciências/Física - Brasil[3]
Universidade Estadual de Ponta Grossa - Departamento de Física - Brasil[4]
Universidade Estadual de Ponta Grossa - Departamento de Matemática e Estatística - Brasil[5]
University of Aberdeen - School of Natural and Computing Sciences - United Kingdom[6]

23000104@uepg.br[1]

Palavras-Chave: Canais iônicos; efeitos quânticos; neurônios.

Resumo

Os neurônios são células nervosas que transmitem sinais elétricos e químicos por todo o corpo. O envio desses sinais ocorre por meio de potenciais de ação, fenômeno caracterizado por mudanças temporárias no potencial da membrana. O modelo matemático de Hodgkin-Huxley descreve a geração desses sinais por meio de canais iônicos. Posteriormente, Bernroider e Summhammer propuseram uma modificação no modelo, introduzindo um termo quântico associado aos canais de sódio (Na^+). Nesse contexto, este trabalho investiga a possível introdução de efeitos quânticos nos canais de sódio (Na^+) e de potássio (K^+), analisando sua influência na dinâmica do potencial de ação neuronal.

I. Introdução

Os neurônios são as principais células do sistema nervoso. Eles atuam no envio e na recepção de sinais elétricos e químicos, que permitem o funcionamento de atividades essenciais do ser humano. Um neurônio é formado por três estruturas básicas: o corpo celular, o axônio e os dendritos. As conexões neurais, comumente conhecidas como sinapses, são os pontos de comunicação entre neurônios. Existem dois tipos de sinapses: químicas e elétricas. Nas sinapses químicas, a transmissão ocorre pela liberação de neurotransmissores, enquanto nas sinapses elétricas, a comunicação é realizada diretamente por meio de canais que conectam células adjacentes.

A propagação dos sinais elétricos ao longo do neurônio ocorre por meio dos potenciais de ação (PA). Estes são gerados por alterações transitórias na permeabilidade

da membrana aos íons, principalmente aos de sódio Na^+ e potássio K^+. Em condições de repouso, a membrana apresenta um potencial elétrico estável. Quando um estímulo suficientemente intenso é aplicado, ocorre a abertura dos canais de sódio dependentes da voltagem, permitindo a entrada rápida de Na^+ e promovendo a despolarização da membrana. Em seguida, os canais de sódio são inativados e os de potássio são ativados, o que favorece o fluxo de K^+ e conduz a membrana de volta ao repouso. Esse conjunto de eventos configura o potencial de ação ao longo do neurônio.

O modelo de Hodgkin-Huxley (HH) descreve matematicamente e fenomenologicamente a membrana excitável do neurônio (Nelson e Rinzel (1998)). Este modelo é caracterizado por um sistema de equações diferenciais não-lineares capaz de expor a dinâmica de condutâncias dos íons presentes no interior e no exterior da membrana, sendo possível, dessa maneira, determinar a corrente iônica e o potencial de ação.

Em "Can Quantum Entanglement Between Ion Transition States Effect Action Potential Initiation?", Bernroider e Summhammer (2012) investigam se efeitos quânticos em canais iônicos podem influenciar a geração do potencial de ação neuronal. Os autores partem do modelo clássico HH e observam que a dinâmica dos canais de sódio é descrita por processos probabilísticos independentes. Entretanto, argumentam que, em escalas atômicas, os estados envolvidos na condução iônica podem não ser completamente independentes, apresentando correlações quânticas capazes de modificar a probabilidade de condução de íons e, por consequência, o funcionamento do potencial de ação (Bernroider e Summhammer (2012)).

De modo análogo, propõe-se, futuramente, o estudo da possível ocorrência de efeitos semelhantes nos canais de potássio. Esses canais desempenham um papel fundamental no funcionamento de PA, auxiliando principalmente na repolarização da membrana neuronal e no retorno ao potencial de repouso. Estudos estruturais e simulações moleculares demonstram que os canais de K^+ apresentam uma elevada seletividade iônica, permitindo a condução eficiente desses íons através de filtros de seletividade (Bernroider e Roy (2005)),

II. Fundamentação Teórica/Materiais e Métodos

A metodologia adotada neste trabalho foi puramente teórica e computacional. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica de artigos científicos sobre a estrutura e a composição dos neurônios. Em seguida, foi analisado o modelo proposto por Bernroider e Summhammer, com foco na incorporação de correlações quânticas aos canais de sódio. De forma complementar, foram realizadas simulações computacionais em Python,

visando reproduzir os resultados descritos na literatura e investigar a possibilidade dessas abordagens nos canais de potássio.

III. Resultados

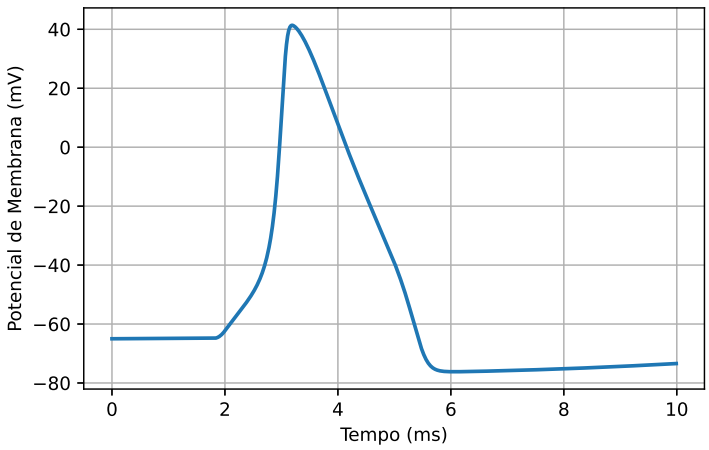
A princípio, foi analisado o modelo clássico (Nelson e Rinzel (1998)), utilizado para descrever a dinâmica dos potenciais de ação em neurônios. Nesse modelo, a evolução temporal do potencial de membrana é dada por

$$C\frac{dV}{dt} = I_{ext} - g_K n^4(V - E_K) - g_{Na} m^3 h(V - E_{Na}) - g_L(V - E_L), \tag{1}$$

onde g_K, g_{Na}, g_L representam as condutâncias associadas aos canais de potássio, sódio e correntes de fuga (escapamentos de outros íons), respectivamente. Os potenciais de equilíbrio são dados por E_K, E_{Na} e E_L, enquanto m, n e h correspondem às variáveis de comporta responsáveis pela abertura e fechamento dos canais iônicos. As variáveis de comporta são descritas por equações diferenciais dependentes da voltagem (V) e podem assumir valores entre 0 e 1, assumindo probabilidades referentes aos estados dos canais. Classicamente, o termo m^3 descreve a probabilidade de três condições independentes serem satisfeitas simultaneamente, o que permite a máxima condução de íons de sódio.

A implementação computacional da Equação (1) foi realizada com base nos parâmetros descritos por Bernroider e Summahammer (2012). Na Figura 1, observa-se um

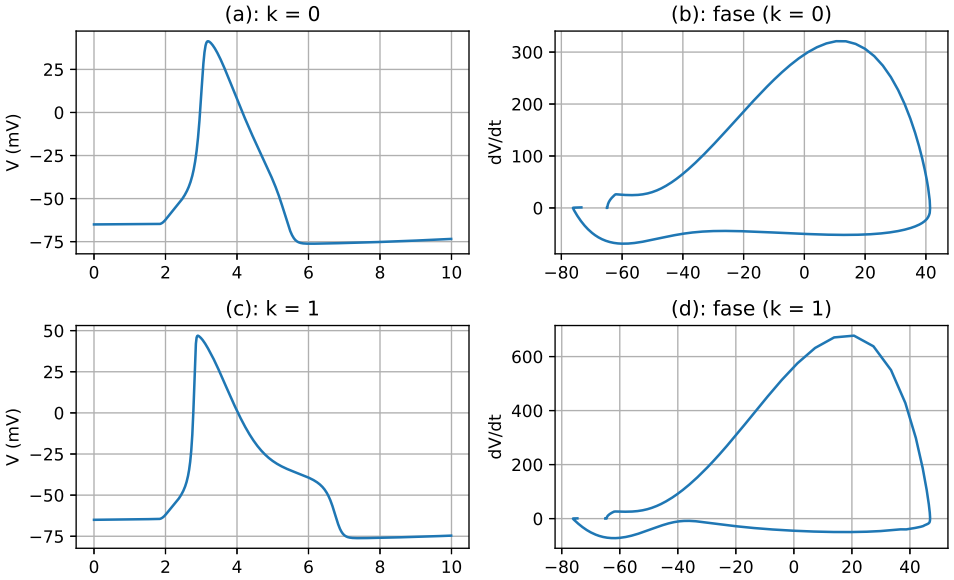
Fig. 1. Potencial de ação simulado pelo modelo clássico de Hodgkin-Huxley, evidenciando as fases de despolarização, repolarização e retorno ao potencial de repouso após a aplicação de um estímulo externo.



Fonte: autores (2026).

comportamento característico do PA, composto por fases de despolarização, repolarização e retorno ao potencial de repouso. Esses resultados reproduzem o que é apresentado na literatura, validando a implementação numérica utilizada.

Fig. 2. Comparação entre o potencial de ação obtido pelo modelo clássico de Hodgkin-Huxley e o modelo com emaranhamento quântico. (a) Potencial de ação obtido pelo modelo clássico ($\kappa = 0$); (b) gráfico de fase correspondente ao modelo clássico; (c) potencial de ação obtido com emaranhamento quântico ($\kappa = 1$), evidenciando uma despolarização mais rápida; (d) gráfico de fase correspondente ao caso com emaranhamento quântico



Fonte: autores (2026).

Em seguida, foram estudadas as modificações propostas por Bernroider e Summhammer (2012), que introduzem correlações quânticas entre os estados de transição associados aos canais de sódio. Os autores, argumentam que, em escalas atômicas, as variáveis de comporta podem não ser completamente independentes, possibilitando eventos quânticos capazes de alterar a probabilidade de condução iônica. Dessa forma, o termo clássico m^3 é substituído por uma expressão dependente do parâmetro κ, que representa o grau de efeitos quânticos. Para valores positivos de κ Equação (2), ocorre um aumento efetivo da condução de íons de sódio, resultando em uma subida mais rápida do potencial de ação.

$$C\frac{dV}{dt} = I_{ext} - g_K n^4 (V - E_K) - g_{Na}[1 + \kappa \frac{3m(1-m)}{1-3m(1-m)}]m^3 h(V - E_{Na}) - g_L(V - E_L), \quad (2)$$

Na Figura 2, apresentam-se os resultados obtidos para o modelo quântico proposto por Bernroider e Summhammer (2012).

Comparando as curvas obtidas às do modelo clássico, observa-se uma aceleração na fase inicial de despolarização. Segundo Bernroider e Summhammer (2012), a inclinação da curva no início do PA pode tornar-se significativamente maior quando se consideram os efeitos quânticos, o que resulta em pulsos mais rápidos do que os previstos classicamente. Desse modo, os resultados reproduzidos neste trabalho fornecem uma base para investigações futuras envolvendo a inclusão de efeitos quânticos em canais de K^+, responsáveis

pela repolarização da membrana neuronal e pelo retorno ao potencial de repouso.

IV. Conclusões

O estudo permitiu compreender os processos envolvidos na geração dos potenciais de ação neuronais, bem como a descrição matemática fornecida pelo modelo de Hodgkin-Huxley. A reprodução computacional dos resultados de Bernroider e Summhammer demonstrou que a incorporação de fenômenos quânticos nos canais de sódio pode produzir alterações significativas na dinâmica de ativação do potencial de ação, especialmente na fase de despolarização. Além disso, a análise da literatura sobre os canais de potássio evidenciou a importância dessas estruturas na repolarização da membrana neuronal e indicou a existência de mecanismos microscópicos que podem justificar futuras investigações sobre comportamentos quânticos nesses canais.

Agradecimentos

A.B.O agradece à Fundação Araucária pela bolsa de Iniciação Científica - programa PIBIC/FA. L.E.B e T.T.T agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Finance Code 001). A.S.M.C agradece à Fundação Araucária, Projeto 305. A.M.B agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Referências

BERNROIDER, G.; ROY, S. Quantum entanglement of k+ ions, multiple channel states, and the role of noise in the brain. In: SPIE. **Fluctuations and Noise in Biological, Biophysical, and Biomedical Systems III**. [S.l.]: Springer Science and Business Media LLC, 2005. v. 5841, n. 1, p. 205–214. ISSN 1866-9964.

BERNROIDER, G.; SUMMHAMMER, J. Can quantum entanglement between ion transition states effect action potential initiation? **Cognitive computation**, Springer, v. 4, n. 1, p. 29–37, fev. 2012. ISSN 1866-9964.

NELSON, M.; RINZEL, J. The hodgkin—huxley model. In: **The book of GENESIS: exploring realistic neural models with the GEneral NEural SImulation System**. [S.l.]: Springer, 1998. p. 29–49. ISBN 9781461216346.