Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM)

Projeto de Pesquisa PIBIC/CNPEM

Dispositivos Sinápticos Chaveados por Íons

Pesquisador responsável: Prof. Dr. Leandro Merces (leandro.merces@ilum.cnpem.br)

Unidade do CNPEM: Ilum Escola de Ciência

Campinas-SP, 30 de abril de 2025

---

1. Introdução

Compreender e replicar as funções complexas do cérebro humano usando a eletrônica não é uma tarefa fácil. Há mais de um século, o neuro anatomista ganhador do Prêmio Nobel Santiago Ramón y Cajal descobriu que o sistema nervoso central humano é composto por uma intrincada rede de conexões entre inúmeros neurônios.[1] O cérebro contém cerca de 100 trilhões de sinapses, que atuam como pontes entre cem bilhões de neurônios.[2] Essas redes neurais biológicas processam informações por meio de eventos sinápticos. Impulsos nervosos na forma de potenciais de ação são gerados por neurônios pré-sinápticos em resposta a informações de entrada ou estímulo recebidas. Esses impulsos são então transmitidos aos neurônios pós-sinápticos por meio das sinapses. Geralmente, a membrana do neurônio cria um potencial de repouso (de -60 a -70 mV) que é excitado ou inibido por estímulos recebidos.[3] Estímulos excitatórios ou inibitórios podem criar voltagem positiva ou negativa, enquanto a combinação de entradas além de um certo limiar gera um potencial de ação que controla o influxo de cátions de cálcio no citoplasma. Este evento libera neurotransmissores na fenda sináptica. No neurônio pós-sináptico, tais transmissores conectam-se a receptores, fazendo com que o canal controlado por ligante permita que íons de sódio entrem na membrana pós-sináptica. Isso transmite ao neurônio subsequente os estímulos de entrada. [4, 5] A interação química dos neurotransmissores com os receptores pós-sinápticos muda sua forma e induz reações subsequentes para ativação iônica. A disparidade abrupta de carga cria o potencial que inicia outro estímulo de ação no terminal pós-sináptico para transmissão de informações. [6] Processos enzimáticos desativam os neurotransmissores ligados aos receptores, causando sua saída em direção à região pré-sináptica para a transmissão subsequente. [7] O peso sináptico entre dois neurônios vizinhos determina a eficiência da transmissão de informações, ou seja, o efeito memória. A mudança no peso sináptico em resposta a estímulos é conhecida como plasticidade,[8] que depende da amplitude e da repetição dos picos do potencial de ação.

Dispositivos sinápticos, com mecanismos de funcionamento inspirados pela sinapse biológica, têm demonstrado grande potencial em inteligência artificial e eletrônica neuromórfica. O baixo consumo de energia, o sensoriamento e a gravação multimodais, e a integração multifuncional são aspectos críticos que limitam suas aplicações. Recentemente, novas arquiteturas de dispositivos sinápticos, que operam por chaveamento iônico, foram desenvolvidas com sucesso e aplicadas oportunamente para perceber o ambiente de maneiras semelhantes às do cérebro – como ocorre com a visão, o tato, o paladar e a audição. Em poucos anos, tais dispositivos já alcançaram velocidades de processamento de dados mais rápidas e

capacidades de memória mais promissoras do que muitos dispositivos neuromórficos convencionais, mesmo operando em tensões mais baixas e consumindo menos energia.

Este projeto tem o foco no progresso da tecnologia de materiais condutores iônicos e eletrônicos, que são essenciais para o desenvolvimento de sinapses artificiais chaveadas por íons. É prevista a exploração desde estratégias de síntese desses materiais e a sua integração em dispositivos eletroquímicos até a caracterização de dispositivos sinápticos multissensoriais de baixa tensão de operação. Os conceitos fundamentais do transporte iônico-eletrônico, o processamento de sinais elétricos pelos dispositivos, a transdução, a plasticidade e a percepção simultânea a estímulos serão explorados de forma construtiva ao longo do projeto.

2. Estado da arte

Nos últimos anos, progressos significativos foram alcançados no desenvolvimento de sistemas sinápticos bioinspirados e neurônios multissensoriais artificiais para memória e percepção (Figura 1a.1).[9-12] Esses dispositivos neuromórficos são capazes de imitar funções neurais básicas e avançadas, como percepção de dor, reconhecimento de padrões[13, 14] e detecção de luz, som e pressão[15-17], além de emular os cinco principais sistemas sensoriais humanos (Figura 1a.2) por meio de redes neurais multissensoriais (Figura 1a.3). Dentre as diversas tecnologias de dispositivos neuromórficos, que levaram ao aumento exponencial do número de publicações desde a década de 2000, os transistores desempenharam um papel importante, especialmente após 2008 (Figura 1b). Particularmente, o transistor chaveado por íons (IGT) ganhou atenção significativa devido às suas características únicas decorrentes de sua modulação de corrente iônica e/ou eletrônica, como alta transcondutância, grande capacitância de porta, baixa frequência operacional e elevada concentração de portadores.[18-20] Essas propriedades e as características estruturais do IGT tornam este dispositivo adequado para aplicações de sinapses artificiais.[21-23] Apesar dos desafios na fabricação do dispositivo devido à integração de 3 terminais elétricos, a modulação de corrente expressiva permitida pelo transporte iônico é crucial para as operações simultâneas de leitura e gravação exigidas pelos sistemas de memória.[24, 25] Após a aplicação de estímulos de potencial elétrico, a porta do IGT pode emular a função pré-sináptica, enquanto a resposta pós-sináptica pode ser adquirida nos eletrodos de fonte e dreno. Estímulos em multiportas podem ser realizados e processados através de um único IGT, fornecendo amplo espaço para coleta de informações

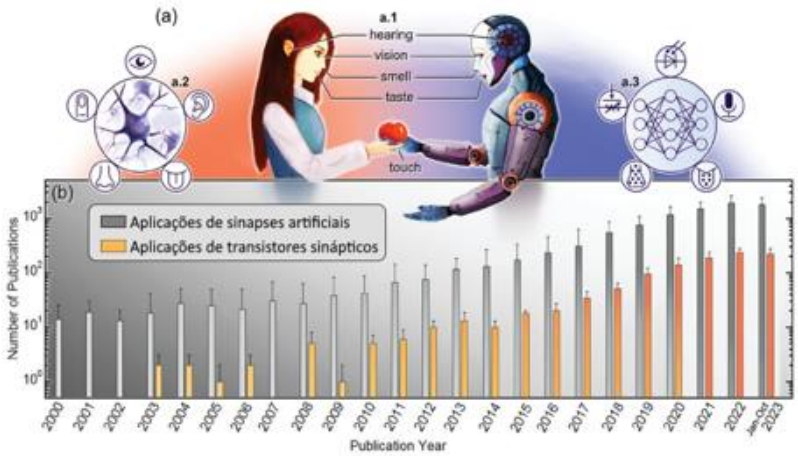

Figura 1. Funções multissensoriais inspiradas pelo cérebro humano. a) Ilustrações esquematicas: a.1) os cinco sistemas sensoriais primários do corpo humano, a.2) funções multissensoriais do cérebro e a.3) sua emulação por redes neurais artificiais. Adaptado com per-missão.[12] *Copyright* 2021, Tan et al. (Springer Nature). **b)** Número de publi-cações em escala logarítmica até 10/ 2023 (*Web of Science*). Adaptado com permissão.[29] *Copyright* 2024, Merces et al. (Wiley).

de várias fontes – como mostrado recentemente para o reconhecimento espaço-temporal aparentemente impossível em dispositivos de dois terminais.[26-28]

3. Objetivos

Esse projeto tem o potencial para explorar conceitos chaves da física da matéria condensada experimental, da física aplicada e da físico-química. Também, é oportunidade para o início do desenvolvimento de capacidades necessárias para a prática de pesquisa de alto nível na área de ciência de dispositivos, que é fundamental e para o entendimento de novos materiais. Os objetivos centrais deste projeto estão listados a seguir:

a. Explorar a síntese de materiais poliméricos condutores iônicos e eletrônicos;

b. Explorar a sua integração em dispositivos sinápticos;

c. Caracterizar dispositivos sinápticos multissensoriais de baixa tensão de operação;

d. Entender os conceitos fundamentais do transporte iônico-eletrônico e a sua influência no processamento de sinais elétricos pelos dispositivos;

e. Desenvolver as habilidades de escrita científica e de oratória do/a candidato/a.

4. Metodologia

Inicialmente, será realizado um estudo dirigido com a revisão bibliográfica sobre os conceitos por trás do transporte iônico-eletrônico, com o objetivo de formar a base teórica necessária para o desenvolvimento do projeto. As principais referências a serem utilizadas nessa etapa estão listadas na bibliografia. Os experimentos e as caracterizações elétricas serão realizados no Laboratório Max Planck, após o preparo dos materiais no Laboratório Rosalind Franklin. Caracterizações complementares por técnicas microscopias de varredura por sonda e de espectroscopia Raman e no infravermelho, visando o entendimento dos materiais envolvidos nas rotas de funcionalização, serão realizadas no Laboratório John Bardeen e no Laboratório Robert Bunsen. Todos os laboratórios mencionados estão localizados na Ilum Escola de Ciência e contam com os equipamentos e materiais necessários para a realização da proposta. Durante o período de vigência do projeto, ocorrerão encontros semanais nos quais o/a candidato/a apresentará seminários com os conteúdos direcionados pelo supervisor, fomentando reflexões e debates. Nessa dinâmica, o supervisor contribuirá com ferramentas teóricas e dicas experimentais relevantes para a execução do projeto. Pretende-se estimular a escrita científica ao longo de todo o projeto, em paralelo à realização das atividades teóricas e experimentais.

5. Bibliografia

[1] R. Y. C. Santiago, Textura del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados, Librería de Nicolás Moya, España, Madrid, 1899.
[2] E. R. Kandel in Principles of Neural Science, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, 2013.
[3] R. Bhunia et al. J. Mater. Chem. C 2023, 11, 7485.
[4] Z. I. Mannan et al. Sensors 2021, 21, 644.
[5] M. Zhang, G. J. Augustine, Cells 2021, 10, 658.
[6] G. Prieto, C. Cotman, Neural Regen. Res. 2017, 12, 1586.
[7] D. Purves et al. Neuroscience, 2nd Eed., Sinauer Associates, Sunderland, USA, 2001.
[8] S. Dai et al. Adv. Funct. Mater. 2019, 29, 1903700.
[9] L. Wei et al. Adv Elect Materials 2022, 8, 2101174.
[10] S. Wang et al. Nat. Electron. 2023, 6, 281.
[11] X. Ji et al. Nat. Commun. 2021, 12, 2480.
[12] H. Tan et al. Nat. Commun. 2021, 12, 1120.
[13] S. Lee, R. Peng, C. Wu, M. Li, Nat. Commun. 2022, 13, 1485.
[14] M. Hu et al. Mater. Horiz. 2022, 9, 2335.
[15] X. Xu et al. Adv. Sci. 2022, 9, 2200629.
[16] C. Tian, L. Wei, J. Jiang, Solid-State Electron. 2022, 194, 108386.
[17] C. Tian, L. Wei, Y. Li, J. Jiang, Curr. Appl. Phys. 2021, 31, 182.
[18] D. Khodagholy et al. Nat. Commun. 2013, 4, 2133.
[19] L. M. M. Ferro et al. Adv. Mater. 2021, 33, 2101518.
[20] L. Xiang, L. Liu, F. Zhang, C. Di, D. Zhu, Adv Funct Materials 2021, 31, 2102149.
[21] P. Gkoupidenis, N. Schaefer, B. Garlan, G. G. Malliaras, Adv. Mater. 2015, 27, 7176.
[22] J. Rivnay et al. Nat. Rev. Mater. 2018, 3, 17086.
[23] L. Gao, M. Wu, X. Yu, J. Yu, Int. J. Extrem. Manuf. 2024, 6, 012005.
[24] H. Han, H. Yu, H. Wei, J. Gong, W. Xu, Small 2019, 15, 1900695.
[25] F. Zhang, C. Li, Z. Li, L. Dong, J. Zhao, Microsyst. Nanoeng. 2023, 9, 16.
[26] Y. H. Liu, L. Q. Zhu, P. Feng, Y. Shi, Q. Wan, Adv. Mater. 2015, 27, 5599.
[27] X. Liu et al. Nanoscale Adv. 2022, 4, 2412.
[28] Y. H. Yang et al. Org. Electron. 2020, 77, 105518.
[29] L. Merces et al. Advanced Science 2024, 11, 2305611.