MECANISMOS NEURAIS RELACIONADOS À INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES PROVENIENTES DE CHIPS CEREBRAIS E SEUS EFEITOS NA NEUROPLASTICIDADE.

Tiago Queiroz[1]; Evaldo Cardoso Gomes[2]

RESUMO

Introdução: O cérebro humano é um mecanismo imensamente dinâmico e complicado que pode lidar com enormes quantidades de informações com uma precisão e velocidade incomparáveis. As Redes Neurais Profundas (DNNs, do inglês *Deep Neural Networks*) têm demonstrado um sucesso notável em muitas aplicações, como visão computacional, reconhecimento de fala e processamento de linguagem natural. Diante disso, essa pesquisa propõe-se a investigar como se deu a evolução de chips neurais nos últimos anos em relatos de diversos autores, levando em consideração que tal campo de estudo pode ser considerado bem recente. **Métodos:** Revisão bibliográfica de literatura realizada nas bases de dados PubMed, IEEE Xplore e Scielo, e foram utilizados os seguintes descritores: “neural chip”, “cerebral plasticity”, “neuroplasticity”, “brain-computer interface”, “neural circuits”, “brain biology”. **Resultados:** Khacef (2023) ressalta a capacidade dos sistemas biológicos de aprender e se adaptar às mudanças em seu ambiente como a chave para a sobrevivência. Essa habilidade de aprendizado é expressa principalmente como a mudança na força das sinapses que conectam os neurônios, para adaptar a estrutura e a função da rede subjacente. **Discussão:** Um modelo *in vitro* que visa simular a situação *in vivo* do cérebro precisa ter vários desses tipos celulares presentes e imitar alguns dos processos funcionais que são essenciais no SNC, como disparos elétricos, ondas de cálcio neuronais e astrocíticas, poda, mielinização, interação célula-célula, migração e neurogênese. **Considerações finais:** Ao longo dos últimos anos, o campo da tecnologia em integração com o corpo humano vem demonstrando diversos avanços, principalmente devido aos avanços também do campo de Inteligências Artificias, contribuindo para esse campo de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Neuroplasticidade; Chips; Mecanismos; Cerebral.

ABSTRACT

Introduction: The human brain is an immensely dynamic and complicated mechanism that can handle enormous amounts of information with unparalleled accuracy and speed. Deep Neural Networks (DNNs) have demonstrated remarkable success in many applications, such as computer vision, speech recognition, and natural language processing. Given this, this research aims to investigate how neural chips have evolved in recent years in reports from various authors, taking into account that this field of study can be considered very recent. **Methods:** Bibliographic review of literature carried out in the PubMed, IEEE Xplore and Scielo databases, and the following descriptors were used: “neural chip”, “cerebral plasticity”, “neuroplasticity”, “brain-

[1] *Acadêmico de medicina do Centro Universitário Atenas, e-mail:tiagoqueiroz6@hotmail.com*
[2] *Professor, mestre e orientador no Centro Universitário Atenas, e-mail: gomesevaldo@uol.com.br*

computer interface", "neural circuits", "brain biology". **Results:** Khacef (2023) highlights the ability of biological systems to learn and adapt to changes in their environment as the key to survival. This learning ability is mainly expressed as changing the strength of the synapses that connect neurons, to adapt the structure and function of the underlying network. **Discussion:** An in vitro model that aims to simulate the in vivo situation of the brain needs to have several of these cell types present and imitate some of the functional processes that are essential in the CNS, such as electrical firing, neuronal and astrocytic calcium waves, pruning, myelination, interaction cell-cell, migration and neurogenesis. **Final considerations:** Over the last few years, the field of technology in integration with the human body has demonstrated several advances, mainly due to advances in the field of Artificial Intelligence, contributing to this field of study.

KEYWORDS: *Neuroplasticity; chips; Mechanisms; Cerebral.*

1 INTRODUÇÃO

Ahmed (2023) destaca que o cérebro humano é um mecanismo imensamente dinâmico e complicado que pode lidar com enormes quantidades de informações com precisão e velocidade incomparáveis. A rede de neurônios e as conexões entre eles, conhecidas como sinapses, que permitem a transmissão de informações por todo o cérebro, são responsáveis por essa extraordinária capacidade de processamento.

De acordo com Wei (2024), as Redes Neurais Profundas (DNNs, do inglês *Deep Neural Networks*) têm demonstrado um sucesso notável em muitas aplicações, como visão computacional, reconhecimento de fala e processamento de linguagem natural.

Diante disso, Wang (2023) diz que as redes neurais de pulso (SNN, do inglês *Spiking Neural Network*) e as arquiteturas neuromórficas baseadas em eventos têm ganhado uma popularidade cada vez maior em sistemas inteligentes de borda de baixo custo e eficientes em energia, pois imitam de perto o mecanismo do cérebro humano ao utilizar pulsos binários espacialmente e temporalmente esparsos para representar e processar informações sensoriais nos neurônios.

Dentre os modelos de redes neurais existentes, podemos mencionar aqui o *Neuralink*, da empresa fundada por Elon Musk, é um dos mais inovadores e ambiciosos. Esse chip tem como objetivo criar uma interface de alta capacidade entre o cérebro humano e dispositivos externos, como computadores, com o intuito de tratar condições neurológicas, como paralisia, e eventualmente melhorar as capacidades cognitivas humanas.

Outro modelo amplamente discutido é o *NeuroPace RNS System*, um dispositivo aprovado pela FDA (Administração de Alimentos e Medicamentos dos EUA) para tratar epilepsia. Esse chip funciona monitorando a atividade elétrica do cérebro em tempo real e intervindo automaticamente ao detectar padrões associados a convulsões, emitindo estímulos elétricos para interromper a crise.

Outro exemplo é o *Deep Brain Stimulation (DBS),* um método de estimulação cerebral profunda utilizado há décadas no tratamento de doenças como o Parkinson. O DBS envolve a implantação de eletrodos

no cérebro que são conectados a um dispositivo similar a um marcapasso, o qual envia sinais elétricos para regiões específicas, ajudando a controlar os sintomas motores. Embora o DBS tenha mostrado eficácia, especialmente em pacientes com Parkinson e tremores essenciais, suas desvantagens incluem a necessidade de ajustes frequentes, além de efeitos colaterais como dificuldades de fala e equilíbrio.

Além desses modelos, há o desenvolvimento de chips neurais menos invasivos, como o *BrainGate,* que busca captar sinais neurais através de um sistema de eletrodos implantados no córtex motor. Esse sistema tem demonstrado promissoras aplicações em permitir que pacientes tetraplégicos consigam controlar dispositivos externos apenas com os pensamentos, como próteses robóticas ou computadores. O principal desafio do BrainGate é a sua capacidade de se manter funcional a longo prazo, já que o cérebro tende a encapsular eletrodos estranhos com tecido cicatricial, o que pode diminuir a eficácia do dispositivo ao longo do tempo.

Todo esse desenvolvimento de chips neurais nos últimos anos levam a possibilidade do uso deles em processos mais complexos, como a plasticidade cerebral. Khacef (2022) destaca em seu trabalho o ponto da plasticidade cerebral, uma vez que, a adaptabilidade do cérebro quanto a implementação de chips não é um assunto que pode ser descartado, levando em consideração que a aceitação de um organismo vivo para esses dispositivos se faz muito relevante para o desenvolvimento desse campo.

Nesse meio, Ma (2023) apresenta em sua pesquisa um exemplo de sistema voltado para integração entre cérebro e chips, sendo essas as interfaces cérebro-computador, as quais são projetadas para contornar os nervos e músculos do usuário para realizar interação direta entre o cérebro e dispositivos externos por meio de sinais cerebrais, destacando a possibilidade de aplicações médicas e não médicas para esses dispositivos.

Tais aplicações descritas pelo autor já envolvem os aspectos dentro da plasticidade cerebral, levando em consideração que o próprio sistema nervoso precisa passar pelo processo de adaptação a esse tipo de sistema voltado a respostas físicas junto a chips cerebrais.

Diante disso, essa pesquisa tem como objetivo analisar o potencial da aplicação dos chips neurais no que concerne à indução da plasticidade cerebral em uma interface cérebro-máquina. Investigando como se deu a evolução de chips neurais nos últimos anos em relatos de diversos autores, levando em consideração que tal campo de estudo pode ser considerado bem recente, o que implica na possibilidade de estudos inconclusivos até o presente momento.

2 MÉTODOS

O presente trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica de caráter exploratório. De acordo com Sampaio (2022), a pesquisa exploratória tem como objetivo reforçar a compreensão do pesquisador sobre um problema específico, uma atividade crucial no estágio inicial de investigações. Ao aprofundar o entendimento da questão em estudo, é possível aprimorar de forma mais precisa a formulação da pergunta de pesquisa.

A pesquisa também possui uma abordagem qualitativa, que, como Sampaio (2022) aponta, pesquisas de abordagem qualitativa percebem o elemento subjetivo como fundamental para uma compreensão mais completa das estruturas sociais e organizacionais, as quais não podem ser devidamente compreendidas por meio apenas de métodos estatísticos.

Ademais, foram utilizadas as bases de dados PubMed, IEEE Xplore e Scielo, além dos seguintes descritores: “neural chip”, “cerebral plasticity”, “neuroplasticity”, “brain-computer interface”, “neural circuits”, “brain biology”, utilizando o operador booleano “AND”. A data da seleção das publicações de base estão entre 2014 e 2024, sendo os artigos selecionados em inglês e português.

3 RESULTADOS

Khacef (2023) ressalta a capacidade dos sistemas biológicos de aprender e se adaptar às mudanças em seu ambiente como a chave para a sobrevivência. Essa habilidade de aprendizado é expressa principalmente como a mudança na força das sinapses que conectam os neurônios, para adaptar a estrutura e a função da rede subjacente. O substrato neural dessa habilidade tem sido estudado e modelado intensivamente, e muitas regras de aprendizado inspiradas no cérebro foram propostas.

As células que compõem os circuitos neurais, principalmente os neurônios, são incrivelmente dinâmicas. Eles se comunicam através de sinapses, onde ocorrem trocas de neurotransmissores que podem ser moduladas em resposta a estímulos internos e externos. (KHACEF, 2023).

Kramer (2024) destaca que a pesquisa em chips neurais explora a interação entre esses circuitos biológicos e dispositivos eletrônicos implantáveis, abrindo novas fronteiras na interface cérebro-máquina. A introdução de chips neurais no tecido cerebral tem o potencial de influenciar diretamente a plasticidade sináptica, oferecendo novos caminhos para restaurar ou até aprimorar funções cerebrais. Por exemplo, em casos de lesões que interrompem os circuitos normais, os chips neurais poderiam fornecer novas vias para a transmissão de sinais, potencialmente auxiliando na recuperação da função.

Além dos neurônios, outras células, como os astrócitos e os oligodendrócitos, desempenham papéis críticos na manutenção da integridade e funcionalidade dos circuitos neurais. Os astrócitos, por exemplo, regulam o ambiente químico em torno das sinapses e influenciam a transmissão sináptica e a plasticidade. Os oligodendrócitos são responsáveis pela mielinização dos axônios, o que aumenta a velocidade da transmissão dos impulsos nervosos.

Além disso, ao priorizar os mecanismos neurais subjacentes a essa integração entre chip e cérebro humano, há a possibilidade de desenvolver estratégias eficazes para restaurar a função cerebral comprometida, promovendo, assim, a reabilitação e a melhora da qualidade de vida de pacientes que apresentem alguma desordem oriunda do sistema nervoso central (SNC) e do sistema nervoso periférico (SNP).

Kramer (2024) destaca que a plasticidade cerebral-capacidade do cérebro de se adaptar e de se reorganizar em resposta a novas experiências e estímulos- é fundamental para aumentar o nível de consciência do ser humano a respeito do mundo e das informações. Logo, a introdução de chips neurais no cérebro oferece oportunidades para modular e potencializar a plasticidade cerebral de maneira inovadora.

Outrossim, compreender os efeitos desses dispositivos na plasticidade cerebral pode favorecer a criação de intervenções terapêuticas personalizadas que visam otimizar a recuperação funcional e promover a aprendizagem e a adaptação neural em indivíduos com diferentes condições neurológicas.

Khacef (2023), também explica que o princípio da localidade na plasticidade sináptica pressupõe que todas as informações de que uma sinapse precisa para atualizar seu estado (por exemplo, seu peso sináptico) são diretamente acessíveis no espaço e imediatamente acessíveis no tempo. Essas informações geralmente se baseiam na atividade dos neurônios pré e pós-sinápticos aos quais a sinapse está conectada, e não na atividade de outros neurônios aos quais a sinapse não está fisicamente conectada.

De acordo com Ahmed (2023), nos últimos anos, o campo da computação neuromórfica tem visto muita pesquisa, à medida que os pesquisadores tentam criar chips de computador que possam imitar as ações das sinapses biológicas.

Ahmed (2023), também aponta a importância da plasticidade nesse sistema, já que a plasticidade é mediada por um complexo conjunto de processos moleculares e celulares, incluindo a modificação da força sináptica, a formação de novas sinapses e até a neurogênese em certas regiões do cérebro, como o hipocampo.

Ahmed (2023) ressalta que materiais biocompatíveis podem ser incorporados ao design de chips de computador neuromórficos porque permitem o desenvolvimento de sinapses artificiais que podem imitar a função das sinapses biológicas. Ao capacitar os computadores a aprender e se adaptar de maneiras anteriormente consideradas impossíveis, isso tem o potencial de revolucionar a área de inteligência artificial.

Tendo como base os conteúdos expostos acima, Wang (2023) propõe em sua pesquisa um processador neuromórfico digital de borda com aprendizado de SNN (Redes Neurais de Pulsos) totalmente conectadas em múltiplas camadas, integradas ao chip para reconhecimento rápido e preciso de objetos. Um macro-core (MCore) mapeia parte ou toda uma camada FC, onde cada micro-core (μCore) executa as operações de múltiplos neurônios de pulso Leaky Integrate-and-Fire (LIF) nessa camada FC, por meio de uma multiplexação temporal. Uma unidade de erro de saída calcula os erros de saída do SNN e os transmite para todos os MCores para realizar o treinamento *DeepTempo* no chip.

A explicação do autor, também pode ser descrita dentro de processos de *Machine Learning*, conhecido como “aprendizado da máquina”, o que é descrito por Lobov (2023) como método para que sistemas entendam como uma função deve ser executada através de repetição de processos (sendo esse o treinamento *DeepTempo* descrito pelo autor apenas uma variação do *Machine Learning* ao se utilizar de uma quantidade de informação muito mais robusta em decorrência do tempo necessário para o aprendizado da máquina).

Em um estudo apresentado por Kramer (2024), um sistema de IA aprendeu a reconhecer palavras usando as experiências de um único bebê. O algoritmo foi treinado com 61 horas de vídeo gravado com uma câmera de cabeça usada por um bebê por curtos períodos. Também foram fornecidas transcrições das palavras faladas para a criança durante a gravação.

O sistema aprendeu palavras como 'berço' e 'bola' construindo associações entre imagens e palavras sem nenhum outro conhecimento prévio sobre a linguagem. Isso desafia a teoria de que os bebês precisam de algum conhecimento inato sobre como a linguagem funciona.

Tal aplicabilidade está ligada aos estudos *DeepTempo*, ressaltando nesse tipo de pesquisa que, os sistemas de IA podem sim vir a executar ações básicas e funcionais quando tem a disponibilidade de uma fonte para realizarem o devido *Machine Learning*.

Esse processo seria capaz de armazenar junto ao sistema informações de longo prazo, como uma forma básica da mente humana, possibilitando assim criar uma relação entre esse processo e a plasticidade cerebral.

Ali (2024), apresenta dentro dos campos de neurociência e neuro engenharia que pesquisadores utilizam sistemas de loop fechado para responder à atividade neural em tempo real, por exemplo, para estimular um circuito neural ou controlar um efetor final a fim de testar propriedades do cérebro ou construir dispositivos que interajam com ele para fins terapêuticos.

O autor ainda aponta que, em pesquisas com interfaces cérebro-computador intracorticais (iBCI), sistemas de loop fechado permitiram que pessoas com paralisia controlassem um braço robótico, soletrassem frases e movessem membros com estimulação elétrica funcional. Esses sistemas são chamados de 'loop fechado' porque o cérebro controla alguma ação via iBCI e o usuário recebe feedback visual dessa ação em tempo real.

Ali (2024) ainda fala desses sistemas destacando que sistemas de loop fechado devem atender a rigorosos requisitos de temporização que são derivados das escalas de tempo dos processos neurais sendo estudados. Potenciais de ação neuronal, ou "picos", possuem uma forma de onda na ordem de milissegundos, então sistemas que processam dados de picos precisam adquirir a forma de onda com resolução sub-milissegundo e detectar eventos de picos com resolução de 1 kHz.

Esses fatores e processos demonstram a preocupação do campo em garantir que tudo seja feito da melhor forma possível, atingido os objetivos sem que afete o sujeito de uma forma inesperada ou apresente um mal funcionamento que venha a causar danos severos a saúde, destacando que esse campo de pesquisa, ainda recente, exige cautela em seus experimentos e tudo deve ser feito levando em consideração primeiramente o bem-estar dos envolvidos.

4 DISCUSSÃO

Ahmed (2023) corrobora com essa relação, ao relatar em sua pesquisa a existência cada vez maior de possibilidades de integração de materiais biológicos dentro da tecnologia. Essas características inerentes facilitam a integração perfeita com tecidos orgânicos e permitem o uso de configurações anatômicas não convencionais. Materiais biocompatíveis são muito adequados para emular sinapses biológicas devido à sua notável maleabilidade. A adaptação dinâmica das sinapses biológicas é um requisito fundamental para as conexões cerebrais intrincadas e em constante evolução.

Hasan (2016) destaca que avanços nas técnicas de micro fabricação e cultura de neurônios tornaram possível controlar a conectividade entre neurônios dissociados ou fatias. Agora é possível imaginar a construção de circuitos neurais vivos de complexidade e precisão crescentes para entender a capacidade do cérebro de processar e armazenar informações.

Entretanto, Lobov (2023) explica as complicações quanto ao processo de tentar replicar processos cerebrais através de máquinas. O sistema nervoso central (SNC) consiste em numerosos tipos diferentes de células, como neurônios, oligodendrócitos, astrócitos e micróglia, todos com papéis cruciais para a biologia e função dos órgãos. Existem vários tipos de neurônios que liberam diferentes neurotransmissores que induzem diversas respostas. A comunicação precisa e a regulação entre essas células (neurônios-neurônios e neurônios-células gliais) são de grande importância para a função do SNC.

Portanto, um modelo *in vitro* que visa simular a situação *in vivo* do cérebro precisa ter vários desses tipos celulares presentes e imitar alguns dos processos funcionais que são essenciais no SNC, como disparos elétricos, ondas de cálcio neuronais e astrocíticas, poda, mielinização, interação célula-célula, migração e neurogênese. (Lobov, 2023).

Diante disso, Hasan (2016) explica melhor o funcionamento desses modelos. O autor relata que o protocolo típico começa com a dissociação de uma região específica do cérebro em células individuais e o plaqueamento dessas células em um substrato que foi revestido para promover a adesão celular. Nutrientes e fatores de crescimento necessários são adicionados, e as culturas são mantidas em pH e temperatura fisiológicos.

O autor ainda explica que após o plaqueamento, os neurônios começam a estender processos que eventualmente se diferenciam em axônios e dendritos. O crescimento de axônios e dendritos é acompanhado pela formação de sinapses entre os neurônios cultivados. A atividade espontânea em redes corticais e hipocampais conectadas aleatoriamente foi analisada através do plaqueamento de neurônios em matrizes de eletrodos múltiplos planares (MEAs). As gravações revelaram que a frequência de potenciais de ação espontâneos e de surtos sincronizados aumentou com o tempo em cultura. Comparações entre culturas de baixa densidade e alta densidade (número de neurônios plaquetados por área) mostraram que a disponibilidade de parceiros pós-sinápticos influenciou os padrões de conectividade.

Como um modelo ativo em estudo quanto a sua receptividade cerebral, Parikh (2024) cita o neuralink. Neuralink é um dispositivo composto por múltiplos chips, uma bateria sem fio e outros componentes eletrônicos de suporte dentro de um implante. Fios ultrafinos (64 deles com 1.024 eletrodos) que saem desse implante são semelhantes a tentáculos que se espalharão para diferentes partes do cérebro.

Desde que estudos de potenciação ou depressão sináptica foram conduzidos por meio de gravações intracelulares simultâneas de pares ou trios de neurônios, os pesquisadores buscaram um método para aumentar a probabilidade de que qualquer par de neurônios esteja conectado. Isso foi realizado desenvolvendo protocolos para culturas neurais de densidade muito baixa, uma vez que a disponibilidade de parceiros pós-sinápticos influencia o padrão de conectividade.

Tendo em vista esses modelos, a reportagem de Guimarães (2024) apresenta contestações científicas quanto a implantes neurais voltados para o aprimoramento da visão humana. Porém, nessa mesma reportagem é possível destacar a existência de implantes para a visão humana em um estágio inicial, que já vem demonstrando a receptividade cerebral para o implante, sendo as contestações baseadas em fatores de funcionalidade, e não de receptividade.

Essas complicações para envolvimento do cérebro com chips neurais também são apontadas por Wang (2022), o qual relata em seu trabalho a existência de neuromórficos de baixo-custo (ASICs e

FPGAs) que não são capazes de realizar o processo de *Machine Learning* e armazenamento de informação capaz de replicar a plasticidade cerebral humana.

Ma (2022), também apresenta em sua pesquisa essas dificuldades em sistemas integrados ao cérebro humano, o autor destaca seu trabalho com um sistema computacional integrado ao cérebro (BCI), mas, destaca certos problemas com esse sistema.

Diante dessa problemática, Ma (2022), Wang (2022) e Lobov (2023), corroboram em seus trabalhos com a necessidade de se ter mais pesquisas nessa área, a possibilidade de se replicar a plasticidade cerebral ou auxiliar pessoas utilizando de chips cerebrais pra isso se encontra ainda em período de desenvolvimento, muitas barreiras de design, interface de uso, experiência de usuário, materiais e se utilizar e até efeitos a longo prazo ainda merecem atenção para chegar a um modelo funcional e satisfatório nesse meio.

Agora, quanto as limitações do campo de pesquisa, Kramer (2024) relata que quando o pesquisador de bioinformática Hunter Moseley e seus colegas estavam revisando algoritmos de bioquímica, três artigos apresentavam um problema catastrófico de 'vazamento de dados': os dados usados para treinamento e aqueles usados para avaliação estavam contaminados com entradas duplicadas. A boa notícia é que os autores de dois dos artigos tinham disponibilizado completamente seus dados, código e resultados, permitindo que o problema fosse encontrado e resolvido. O outro artigo não fez isso, tornando impossível avaliar adequadamente seus resultados. A lição, escreve Moseley, vai além de simples retrações impulsivas de pesquisas falhas. Em meio a um boom de ciência orientada por dados, boas práticas de reprodutibilidade são mais importantes do que nunca.

Patel (2017) destaca que vários grupos lançaram pacotes de software para construir sistemas em tempo real, mas eles carecem dos recursos necessários para executar tanto o código altamente otimizado em C/C++ que lida com aquisição de dados quanto o código modular em Python que as bibliotecas modernas de aprendizado de máquina são construídas.

Eles são tipicamente projetados para executar código em um conjunto limitado de linguagens de programação, tornando difícil encontrar um sistema que ofereça amplo suporte para as muitas linguagens de alto nível usadas no campo da neurociência, incluindo Python, MATLAB e Julia. Simulink Real-Time (Mathworks) fornece uma interface de programação visual que suporta código MATLAB e C/C++ em tempo real. RTXI e Falcon oferecem garantias de temporização em submilissegundos, mas são restritos a executar código em C/C++.

O autor ainda destaca que, parcialmente, devido ao desafio de implantá-los em tempo real, modelos computacionais que são promissores para aplicações de neurociência em loop fechado muitas vezes não são testados em um ambiente de loop fechado. Esses modelos foram desenvolvidos com análises offline em dados existentes, que são importantes para iterar rapidamente sobre arquiteturas de modelos e hiperparâmetros, mas não conseguem capturar a resposta em tempo real do cérebro em situações que envolvem feedback de loop fechado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo dos últimos anos, o campo da tecnologia em integração com o corpo humano vem demonstrando diversos avanços, principalmente devido aos avanços também do campo de Inteligências Artificias, contribuindo para esse campo de estudo.

Quanto ao objetivo desse trabalho, é notório o potencial de aplicação de chips cerebrais e sua receptividade para o cérebro humano, podendo agir de forma integrada ao cérebro por meio de vários métodos de aplicação.

Por se tratar de um campo de estudo muito recente, não temos até então estudos que corroboram com essa área a longo prazo, e ainda não se pode dizer qual forma de aplicação ou utilização desses dispositivos é a mais adequada para certos casos, nem mesmo seus efeitos colaterais a longo prazo.

Com isso, também vale ressaltar as limitações do campo, tanto quanto ao uso de linguagens de programação e sua adequação a esse modelo, falta de um aprimoramento em utilizações, sendo várias aplicações ainda básicas e não tão atualizadas e até mesmo a dificuldade de aplicação em tempo real desses mecanismos.

Portanto, mesmo a área apresentando uma evolução promissória e tendo aplicabilidades práticas que não eram possíveis a alguns anos, estudos a longo prazo e adaptação desses mecanismos junto ao cérebro humano ainda devem vir a ser realizados, visando um sistema capaz de se adequar da forma ideal ao cérebro humano e se integrar ao processo de plasticidade cerebral.

REFERÊNCIAS

AHMED, Tanvir. Bio-inspired artificial synapses: Neuromorphic computing chip engineering with soft biomaterials. **Memories-Materials, Devices, Circuits and Systems**, v. 6, p. 100088, 2023.

ALI, Yahia H. et al. BRAND: a platform for closed-loop experiments with deep network models. **Journal of Neural Engineering**, v. 21, n. 2, p. 026046, 2024.

CARVALHO, Jane; SANTOS, Laurita; NAVARRO, Ricardo. Impacto terapêutico da fotobiomodulação no tratamento da doença de Alzheimer: uma revisão integrativa. **Research, Society and Development**, [*s. l.*], ano 2021, v. 10, ed. 8, 13 mar. 2022.

DETURE, Michael; DICKSON, Dennis. O diagnóstico neuropatológico da doença de Alzheimer. **Neurodegeneração molecular**, [*s. l.*], 2 ago. 2019.

GUIMARÃES, Lucas. Cientistas contestam alegação de Elon Musk sobre implante para turbinar visão. **CNN**. 2024. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/cientistas-contestam-alegacao-de-elon-musk-sobre-implante-para-turbinar-visao/ Acesso em: 07 Ago. 2024.

HASAN, Md Fayad; BERDICHEVSKY, Yevgeny. Neural circuits on a chip. **Micromachines**, v. 7, n. 9, p. 157, 2016.

KHACEF, Lyes et al. Spike-based local synaptic plasticity: A survey of computational models and neuromorphic circuits. **Neuromorphic Computing and Engineering**, v. 3, n. 4, p. 042001, 2023.

KHAN, MN Afzal et al. Acupuncture enhances brain function in patients with mild cognitive impairment: evidence from a functional-near infrared spectroscopy study. **Neural regeneration research**, v. 17, n. 8, p. 1850, 2022.

KIN, Ittetsu et al. Vagus nerve stimulation with mild stimulation intensity exerts anti-inflammatory and neuroprotective effects in Parkinson's disease model rats. **Biomedicines**, v. 9, n. 07, p. 789, 2021.

KRAMER, Katrina. AI & robotics briefing: Lack of transparency surrounds Neuralink's 'brain-reading' chip. **NATURE BRIEFING**. 2024. Disponível em: https://www.nature.com/articles/d41586-024-00375-3 Acesso em: 06 Ago. 2024.

LOBOV, Sergey A. et al. Spatial computing in modular spiking neural networks with a robotic embodiment. **Mathematics**, v. 11, n. 1, p. 234, 2023.

MA, Yixin et al. Personalized brain–computer interface and its applications. **Journal of Personalized Medicine**, v. 13, n. 1, p. 46, 2022.

PARIKH, Purvish Mahendra; VENNIYOOR, Ajit. Neuralink and Brain–Computer Interface—Exciting Times for Artificial Intelligence. **South Asian Journal of Cancer**, v. 13, n. 01, p. 063-065, 2024.

PATEL, Yogi A. et al. Hard real-time closed-loop electrophysiology with the Real-Time eXperiment Interface (RTXI). **PLoS computational biology**, v. 13, n. 5, p. e1005430, 2017.

SAMPAIO, Tuane Bazanella. **Metodologia da pesquisa**. 2022.

SOUSA, Amanda; SARAIVA, Mônica; MACHADO, Thaísa; SOUZA, Júlio. O uso da musicoterapia no tratamento de idosos diagnosticados com doença de Alzheimer. **Research, Society and Development**, [*s. l.*], ano 2021, v. 10, ed. 12, 14 set. 2021.

WANG, Haibing et al. TripleBrain: A compact neuromorphic hardware core with fast on-chip self-organizing and reinforcement spike-timing dependent plasticity. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, v. 16, n. 4, p. 636-650, 2022.

WANG, Tengxiao et al. MorphBungee: A 65nm 7.2 mm 2 27μJ/image Digital Edge Neuromorphic Chip with On-Chip 802 Frame/s Multi-Layer Spiking Neural Network Learning. In: **2023 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC).** IEEE, 2023. p. 1-3.

WEI, Wenjie et al. Event-Driven Learning for Spiking Neural Networks. **arXiv preprint arXiv**:2403.00270, 2024.

YANG, Dalin; SHIN, Yong-Il; HONG, Keum-Shik. Systemic review on transcranial electrical stimulation parameters and EEG/fNIRS features for brain diseases. **Frontiers in Neuroscience**, v. 15, p. 274, 2021.