

UM ESTUDO SOBRE O PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS CEREBRAIS NO CONTEXTO DA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL APLICADA À SAÚDE

Eduarda Hoerlle Ribeiro¹

Marco Antônio Ferreira Boaski (orientador)²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, Panambi – RS, Brasil

e-mail: eduarda.2021006350@aluno.iffar.edu.br, marco.boaski@iffarroupilha.edu.br

Resumo - Este artigo apresenta uma revisão teórico-conceitual sobre o processamento digital de sinais cerebrais, com ênfase na integração entre neurociência, automação industrial e ciência de dados. São discutidos os fundamentos neurobiológicos da atividade elétrica neuronal, incluindo potenciais de ação e sinapses, bem como suas alterações em transtornos mentais como ansiedade, depressão e esquizofrenia. Em seguida, analisa-se o funcionamento e as aplicações de técnicas de aquisição de sinais neurais, como eletroencefalograma (EEG), magnetoencefalografia (MEG), eletrocorticografia (ECoG), eletroencefalografia estereotáxica (sEEG) e interfaces cérebro-computador (BCIs), destacando os aspectos técnicos e computacionais envolvidos. A pesquisa evidencia o papel da automação biomédica como campo emergente de atuação para o tecnólogo em automação, especialmente no desenvolvimento de sistemas embarcados e na integração entre *hardware* e *software* para aplicações clínicas. Também são exploradas abordagens avançadas de processamento de sinais, como aprendizado de máquina e redes neurais profundas, que possibilitam a extração de padrões úteis para reabilitação motora, diagnósticos e controle assistivo. Conclui-se que a convergência entre engenharia e neurociência representa um campo promissor para o desenvolvimento de soluções inovadoras na saúde, alinhando-se à formação técnica aplicada do curso de Automação Industrial.

Palavras-Chave – Controle em Tempo Real, Integração Hardware-Software, Potencial de Ação, Sinapse Neural, Sistemas Embarcados.

A STUDY ON THE DIGITAL PROCESSING OF BRAIN SIGNALS IN THE CONTEXT OF INDUSTRIAL AUTOMATION APPLIED TO HEALTHCARE

Abstract – This article presents a theoretical-conceptual review on the digital processing of brain signals, with emphasis on the integration of neuroscience, industrial automation, and data science. It discusses the neurobiological foundations of neuronal electrical activity, including action potentials and synapses, as well as their alterations in mental disorders such as anxiety, depression, and schizophrenia. The article then analyzes the functioning and applications of neural signal acquisition techniques, such as

electroencephalography (EEG), magnetoencephalography (MEG), electrocorticography (ECoG), stereoelectroencephalography (sEEG), and brain-computer interfaces (BCIs), highlighting the technical and computational aspects involved. The research highlights the role of biomedical automation as an emerging field for industrial automation technologists, especially in the development of embedded systems and the integration between hardware and software for clinical applications. Advanced signal processing approaches are also explored, including machine learning and deep neural networks, which enable the extraction of useful patterns for motor rehabilitation, diagnostics, and assistive control. It is concluded that the convergence between engineering and neuroscience represents a promising field for the development of innovative health technologies, aligned with the applied technical training provided by the Industrial Automation program.

Keywords – Action Potential, Embedded Systems, Hardware-Software Integration, Neural Synapse, Real-Time Control.

NOMENCLATURA

SNC Sistema nervoso central.
K⁺ Íon de potássio.
mV Unidade de medida para tensão em milivolt.
Na⁺ Íon de sódio.
ddp Diferença de potencial.
nm Unidade de medida para distância em nanômetro.
Ca²⁺ Íon de cálcio.
PEPS Potencial Excitatório Pós-Sináptico
PIPS Potencial Inibitório Pós-Sináptico
Cl⁻ Íon de Cloreto.
EEG Eletroencefalograma.
HPA Hipotálamo-hipófise-adrenal
MEG Magnetoencefalografia.
BCIs Interfaces Cérebro Computador.
ECoG Eletrocorticografia.
sEEG Eletroencefalografia estereotáxica.
Hz Unidade de Medida de Frequência em Hertz.
CLP Controlador Lógico Programável.
IHM Interface Homem-Máquina.
GAN Rede Generativa Adversarial

1. INTRODUÇÃO

O avanço das neurociências, aliado ao desenvolvimento tecnológico nas áreas de engenharia, computação e automação, tem ampliado significativamente a capacidade de

análise da atividade elétrica cerebral. A integração entre esses campos possibilita o desenvolvimento de ferramentas cada vez mais precisas para aquisição, processamento e interpretação de sinais neurais, com aplicações clínicas, diagnósticas e assistivas.

Estudos recentes no Brasil têm demonstrado a eficácia de redes neurais convolucionais — modelos de inteligência artificial que aprendem a reconhecer padrões em dados, como imagens e registros de atividade cerebral — na classificação de eletroencefalogramas relacionados a crises epilépticas, evidenciando o potencial dessas abordagens em contextos de predição clínica [1]. Outras investigações aplicaram algoritmos de aprendizado de máquina na identificação de emoções humanas básicas a partir de padrões cerebrais, obtendo resultados satisfatórios em termos de acurácia [2].

A detecção de estados mentais, como atenção e relaxamento, também vem sendo estudada com o uso de transformadas *wavelet* — técnicas matemáticas que permitem analisar variações de frequência ao longo do tempo em sinais não estacionários —, com apoio da análise realizada no EEGLab (*Environment for EEG Processing Laboratory*, ou em português, Ambiente de Processamento de EEG), além de classificadores como máquinas de vetores de suporte (SVM), alcançando alta precisão em testes experimentais [3]. Além disso, técnicas como gráficos de recorrência, quando associadas ao aprendizado profundo, têm mostrado elevada eficiência na classificação de tarefas cognitivas e motoras baseadas em sinais eletroencefalográficos [4].

O desempenho desses sistemas depende diretamente da integração com tecnologias da automação industrial. Componentes como sensores, amplificadores, filtros digitais, conversores analógico-digitais (A/D), controladores lógicos programáveis (CLPs), interfaces homem-máquina (IHMs) e sistemas embarcados são amplamente utilizados em contextos biomédicos para garantir maior confiabilidade e responsividade na aquisição e processamento de sinais neurais [5].

Revisões recentes também reforçam a importância do pré-processamento dos sinais, destacando a necessidade de técnicas eficazes para remover artefatos fisiológicos, interferências eletromagnéticas e ruídos musculares, a fim de assegurar a integridade dos dados utilizados em aplicações sensíveis como as interfaces cérebro-computador (*Brain-Computer Interfaces* – BCIs) [6].

Nesse cenário, evidencia-se o papel estratégico da automação industrial como base tecnológica essencial para o desenvolvimento de sistemas neurais inteligentes. A atuação do tecnólogo em automação estende-se para além do ambiente fabril, alcançando laboratórios, clínicas e centros de reabilitação, por meio da inovação e da integração de dispositivos biomédicos.

Diante da relevância desse campo interdisciplinar, este artigo propõe uma análise das principais tecnologias envolvidas no processamento de sinais neurais, com foco na automação industrial como eixo estruturante. Para isso, adota-se uma abordagem teórico-conceitual fundamentada em revisão bibliográfica de fontes nacionais e internacionais recentes.

O conteúdo está organizado em seções que abordam, inicialmente, os fundamentos da neurobiologia e da atividade elétrica neuronal. Em seguida, discutem-se as disfunções em potenciais de ação associadas a transtornos mentais, os métodos de aquisição e processamento digital dos sinais cerebrais, e, por fim, suas aplicações práticas no contexto da automação industrial e das interfaces cérebro-computador.

A. Objetivos

O objetivo geral deste artigo é analisar o estado da arte das tecnologias voltadas ao processamento digital de sinais neurais, ressaltando o papel da automação industrial como base técnica essencial para sua aplicação em contextos clínicos, diagnósticos e assistivos.

De forma específica, busca-se revisar os fundamentos da neurobiologia relacionados à atividade elétrica do sistema nervoso central, com ênfase na geração e propagação dos impulsos neurais, além de investigar a relação entre alterações nesses sinais e distúrbios neuropsiquiátricos.

Também pretende-se discutir os aspectos computacionais envolvidos na aquisição, pré-processamento e interpretação dos dados cerebrais, destacando o uso de técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais profundas.

Por fim, o artigo propõe uma reflexão sobre como a integração entre neurociência, ciência de dados e automação industrial tem contribuído para o desenvolvimento de sistemas inteligentes, especialmente nas áreas de interface cérebro-computador e reabilitação neurológica.

II. INTRODUÇÃO À NEUROBIOLOGIA

A neurobiologia constitui o campo de estudo do sistema nervoso, sendo imprescindível, para a compreensão de seu funcionamento, o conhecimento dos princípios fundamentais relativos à estrutura e à função das células nervosas [7].

A. O Neurônio

O neurônio é uma célula especializada, distinguindo-se das demais principalmente por suas ramificações denominadas neuritos, que se subdividem em axônios e dendritos, conforme demonstrado na Fig. 1 [7].

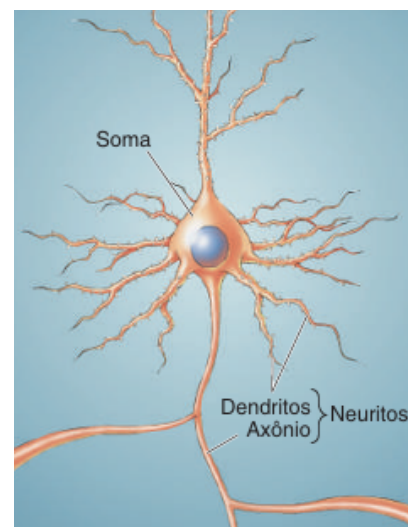


Fig. 1. Representação esquemática de um neurônio, destacando os neuritos e suas subdivisões em axônio e dendritos [7].

Os dendritos são prolongamentos curtos, geralmente ramificados, cuja principal função é receber sinais de outras células e conduzi-los em direção ao corpo celular (ou soma) [7]. Já o axônio é uma extensão única, mais longa e menos ramificada, especializada na condução dos impulsos nervosos que partem do corpo celular em direção a outras células, como neurônios, células musculares ou glandulares [7]. Essa distinção estrutural e funcional entre dendritos e axônio é fundamental para a compreensão dos mecanismos de recepção e transmissão de informações no sistema nervoso.

A nível molecular, a organização estrutural do neurônio pode ser detalhada conforme ilustrado na Fig. 2, a qual apresenta a disposição dos principais componentes que integram essa célula especializada.

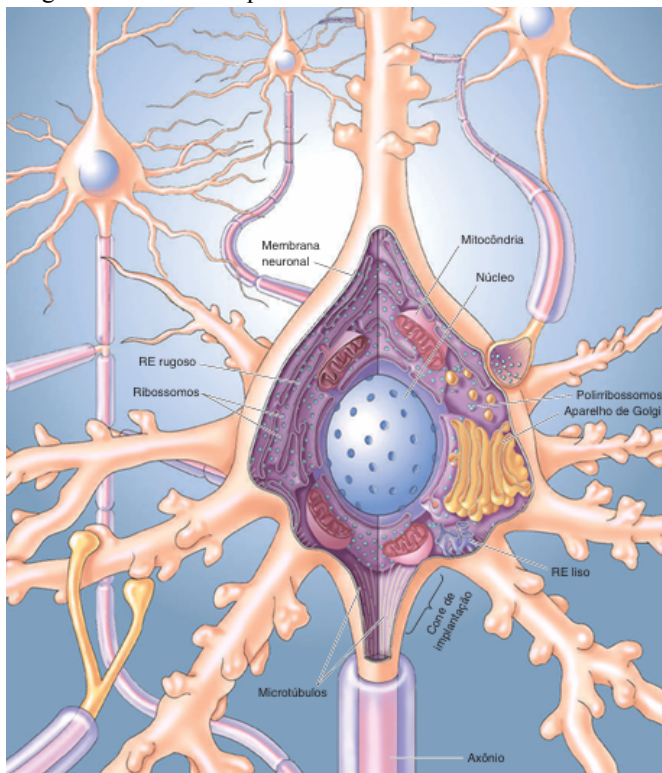


Fig. 2. Ilustração da estrutura celular de um neurônio [7].

As características estruturais do axônio permitem que ele funcione como um fio condutor, assemelhando-se a um cabo telefônico [7]. Contudo, diferentemente do cabo telefônico de cobre, que transmite sinais elétricos por longas distâncias devido aos elétrons livres, o sinal nos neurônios é conduzido por íons, os quais são átomos eletricamente carregados. Essa condução iônica ocorre em um ambiente específico do sistema nervoso central (SNC), que limita a eficiência da transmissão [7].

Além disso, o citosol do axônio — fluido intracelular composto principalmente por água, íons, proteínas e outras moléculas solúveis, responsável por mediar diversas reações bioquímicas — é separado do meio extracelular por uma fina estrutura denominada membrana neuronal. Esta membrana consiste em uma bicamada fosfolipídica, cuja espessura corresponde a duas moléculas de fosfolípidios [7]. Um fosfolípido é constituído por uma molécula polar hidrofílica (atraída pela água) e uma molécula apolar hidrofóbica

(aversiva à água) [7]. A representação da bicamada fosfolipídica, destacando a disposição das moléculas hidrofílicas em contato com os ambientes aquosos interno e externo, e as hidrofóbicas voltadas umas para as outras, pode ser visualizada na Fig. 3.

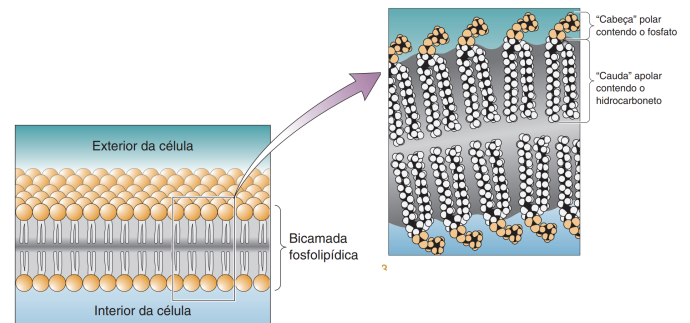


Fig. 3. Ilustração da estrutura molecular da membrana neuronal [7].

Apesar de a bicamada fosfolipídica formar um arranjo estável que isola o citosol do líquido extracelular, existem pequenos poros denominados canais iônicos que atravessam a membrana [7]. Esses canais são formados por conjuntos de moléculas proteicas, geralmente compostos por quatro a seis subunidades proteicas [7]. Um exemplo de canal iônico constituído por cinco subunidades polipeptídicas, no qual se destaca a região hidrofóbica em interação com a bicamada fosfolipídica, é apresentado na Fig. 4.

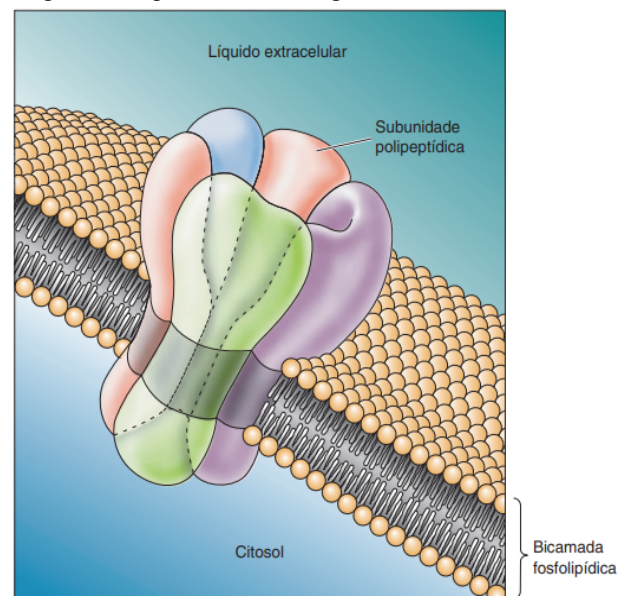


Fig. 4. Ilustração da associação de um canal iônico à bicamada fosfolipídica [7].

Os íons presentes no citosol e no líquido extracelular tendem a se deslocar de regiões de alta para baixa concentração a fim de equilibrar suas quantidades, fenômeno denominado difusão [7]. Tal movimento ocorre somente quando a membrana possui canais permeáveis aos íons e quando há um gradiente de concentração entre os dois lados da membrana [7]. A difusão iônica por meio de canais seletivos está ilustrada na Fig. 5.

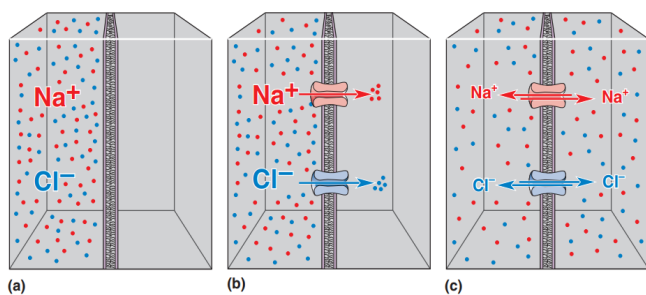


Fig. 5. Exemplificação do movimento de difusão através de canais iônicos [7].

B. Potencial de Ação

Um neurônio em estado de repouso apresenta uma diferença de potencial elétrico (ddp) entre o meio intracelular e o meio extracelular, resultado da distribuição desigual de íons através da membrana plasmática [8]. Essa condição é mantida por mecanismos ativos, sendo o principal deles a bomba de sódio e potássio, uma proteína de membrana que consome energia química (proveniente da quebra da adenosina trifosfato — ATP) para transportar continuamente íons de sódio (Na⁺) para fora da célula e íons de potássio (K⁺) para o seu interior [8].

Como consequência desse transporte assimétrico, o meio intracelular torna-se mais negativo em relação ao exterior, estabelecendo-se o chamado potencial de repouso [8]. Em neurônios, esse valor geralmente se situa em torno de -65 mV, conforme ilustrado na Fig. 6, e é essencial para a excitabilidade celular [8].

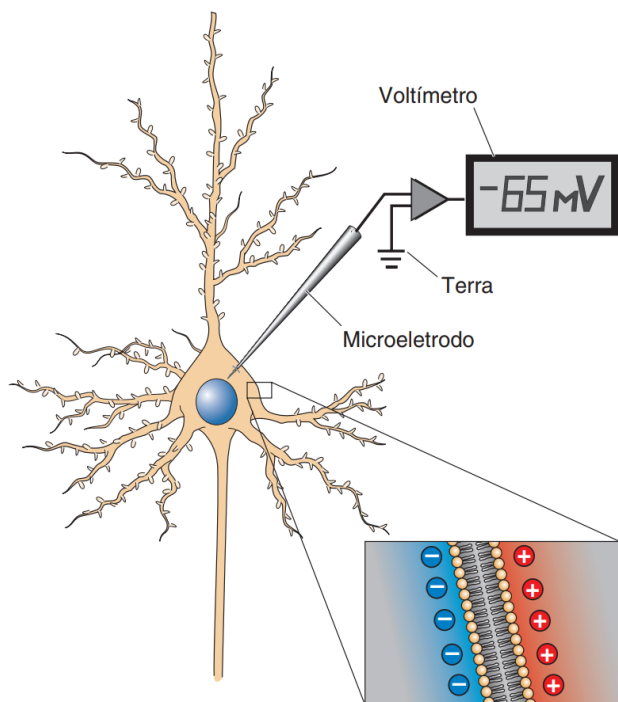


Fig. 6. Ilustração didática da medição de tensão do potencial de repouso da membrana [7].

Quando o neurônio é adequadamente estimulado, ocorrem alterações rápidas e transitórias nesse potencial, desencadeando o chamado potencial de ação [8]. Esse fenômeno consiste em uma inversão breve da polaridade elétrica da membrana, na qual o interior celular torna-se temporariamente mais positivo do que o exterior [8].

Esse impulso nervoso tem início quando canais específicos de sódio sensíveis à tensão se abrem, permitindo a entrada de Na⁺ na célula e causando uma rápida despolarização. A propagação desse sinal só acontece se a despolarização atingir um determinado valor limiar, necessário para gerar o potencial de ação de forma completa [8]. A representação gráfica desse processo, semelhante ao que seria visualizado em um registro oscilográfico, é apresentada na Fig. 7.

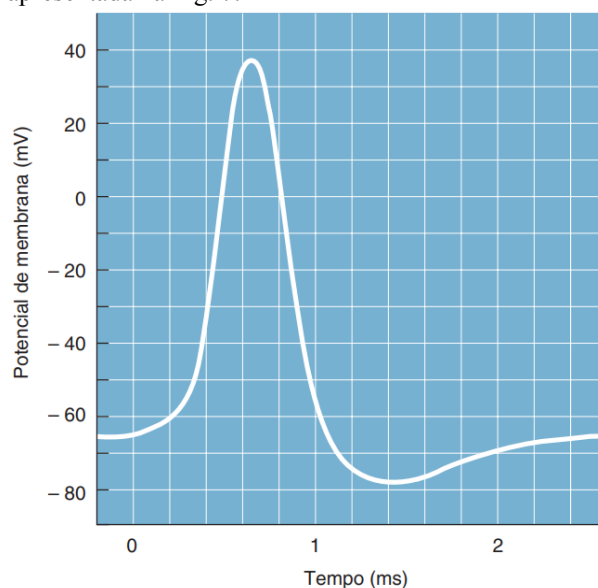


Fig. 7. Representação gráfica de um potencial de ação [7].

O potencial de ação ocorre em etapas bem definidas: inicia-se com a fase ascendente (despolarização), atinge um pico positivo em torno de +40 mV, segue-se a fase descendente (repolarização), passa por um momento de hiperpolarização, quando o interior da célula fica ainda mais negativo que no repouso, e por fim retorna ao estado inicial por ação das bombas iônicas [8]. Essas fases estão ilustradas na Fig. 8.

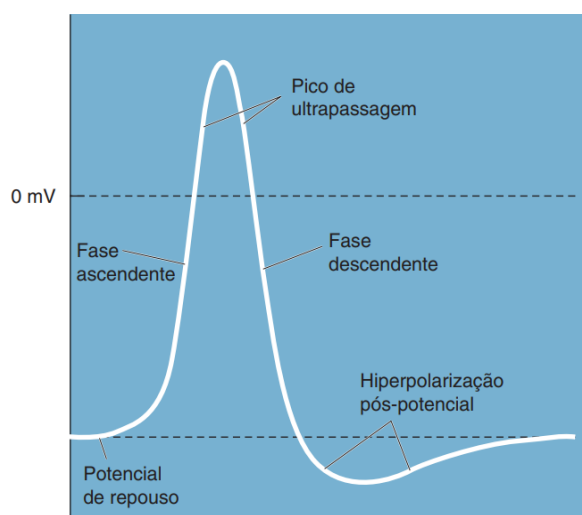


Fig. 8. Representação gráfica contendo a identificação das partes de um potencial de ação [7].

C. Sinapses

Para que o sistema nervoso central (SNC) interprete e integre os sinais gerados nos neurônios, é essencial que esses sinais sejam transmitidos de uma célula para outra por meio de conexões especializadas chamadas sinapses [9]. Essas estruturas são responsáveis pela comunicação entre neurônios e também entre neurônios e células efectoras, como as musculares ou glandulares. Em geral, a transmissão sináptica ocorre em uma única direção: do terminal do neurônio transmissor (pré-sináptico) para a célula receptora (pós-sináptica) [9].

1) *Sinapses elétricas*: As sinapses elétricas representam uma forma direta de comunicação entre neurônios, em que íons fluem livremente através de canais especializados chamados junções comunicantes. Esses canais conectam fisicamente os citoplasmas das células envolvidas, permitindo que o impulso elétrico seja transmitido quase instantaneamente. Essa rápida condução favorece a sincronização da atividade neural. Embora sejam menos frequentes no sistema nervoso humano adulto, desempenham funções importantes em regiões onde a velocidade de transmissão é essencial [9]. A Fig. 9 ilustra a estrutura típica dessas junções.

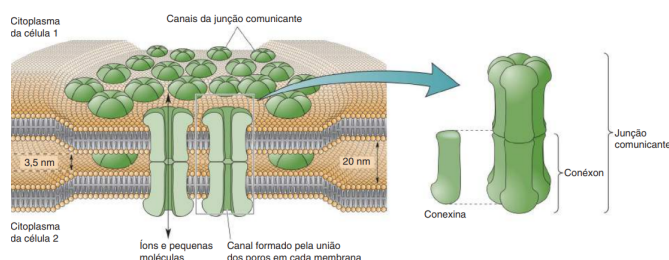


Fig. 9. Ilustração de junções comunicantes [7].

2) *Sinapses químicas*: As sinapses químicas, por sua vez, são o tipo predominante de conexão no sistema nervoso. Nelas, a informação não é transmitida diretamente como corrente elétrica, mas por meio da liberação de substâncias químicas chamadas neurotransmissores [9]. Essas

substâncias são armazenadas em vesículas no terminal pré-sináptico e liberadas quando um potencial de ação atinge essa região, provocando a abertura de canais de cálcio dependentes de tensão [9]. O aumento da concentração de íons de cálcio (Ca^{2+}) estimula o processo de exocitose, pelo qual as vesículas se fundem à membrana e liberam seu conteúdo na fenda sináptica — um pequeno espaço entre as duas células [9]. Ao atingir a membrana pós-sináptica, os neurotransmissores se ligam a receptores específicos, desencadeando respostas que podem ser excitatórias ou inibitórias, dependendo do tipo de neurotransmissor e receptor envolvidos [9]. Esse processo é ilustrado na Fig. 10.

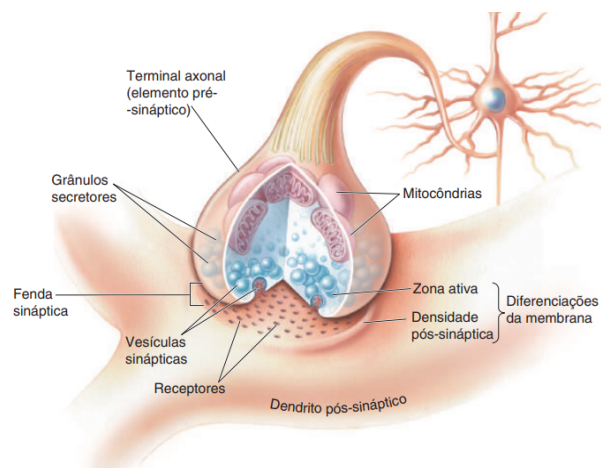


Fig. 10. Ilustração da conexão entre um neurônio pré-sináptico e um neurônio pós-sináptico [7].

D. Resposta Elétrica Pós-Sináptica

A transmissão do sinal nervoso entre neurônios ocorre, em grande parte, por meio da liberação de neurotransmissores na fenda sináptica, os quais interagem com receptores específicos localizados na membrana da célula pós-sináptica [7]. Essa interação é fundamental para o desencadeamento de modificações elétricas na célula receptora. Os receptores podem ser divididos em dois grupos funcionais principais: os canais iônicos dependentes de ligante, que se abrem diretamente em resposta à ligação do neurotransmissor, e os receptores acoplados a proteínas G, que atuam indiretamente por meio de segundos mensageiros [7].

A abertura destes canais permite o fluxo de íons, resultando em alterações do potencial de membrana. Quando esse fluxo leva à entrada de cargas positivas — como Na^+ — ocorre uma despolarização da membrana, fenômeno conhecido como potencial excitatório pós-sináptico (PEPS) [7]. Essa despolarização aumenta a probabilidade de geração de um potencial de ação na célula pós-sináptica, facilitando a continuidade do impulso nervoso [7].

Em contrapartida, o potencial inibitório pós-sináptico (PIPS) ocorre quando há um aumento da negatividade no interior da célula, geralmente devido à entrada de íons cloreto (Cl^-) ou à saída de K^+ [7]. Esse processo afasta o potencial de membrana do limiar necessário para a geração de um novo impulso, dificultando a excitação da célula [7].

A combinação de diversos PEPS e PIPS, originados em diferentes sinapses e em momentos distintos, contribui para a atividade elétrica do cérebro [7]. Quando esses sinais ocorrem juntos e de forma coordenada, especialmente em

grupos de neurônios do córtex cerebral, eles geram pequenas correntes elétricas que podem ser captadas fora do crânio por meio do eletroencefalograma (EEG) [7].

Esse efeito acontece graças a um fenômeno chamado soma temporal e espacial das correntes sinápticas. Em termos simples, a soma temporal acontece quando um mesmo neurônio recebe vários sinais seguidos, com pouco intervalo de tempo entre eles [7]. Mesmo que cada sinal isoladamente seja fraco, quando chegam em sequência rápida, eles se somam e produzem um efeito maior [7].

Já a soma espacial ocorre quando um único neurônio recebe sinais ao mesmo tempo, mas de diferentes locais ao longo de sua membrana [7]. Mesmo que cada sinal venha de uma região diferente e seja pequeno, todos juntos podem gerar uma resposta mais forte [7].

Portanto, o sinal que o EEG registra não vem de um único neurônio, mas da soma de muitos sinais que chegam quase ao mesmo tempo em diferentes partes do cérebro. Essa atividade elétrica conjunta é o que permite ao EEG detectar padrões cerebrais, como os relacionados ao sono, atenção ou emoções [7].

III. POTENCIAIS DE AÇÃO E SUA DISFUNÇÃO EM TRANSTORNOS NEUROPSIQUIÁTRICOS

Conforme explorado anteriormente, os potenciais de ação constituem eventos fundamentais para a comunicação neuronal, caracterizando-se por rápidas variações no potencial de membrana decorrentes da abertura sequencial de canais de íons dependentes de tensão, especialmente de Na^+ e K^+ [7]. Essas alterações permitem a propagação do sinal elétrico ao longo do axônio e culminam na liberação de neurotransmissores nas sinapses, possibilitando a transmissão da informação entre neurônios [7].

Dando continuidade à introdução dos fundamentos da neurobiologia e ao entendimento da estrutura e funcionamento dos neurônios, é essencial aprofundar a análise dos potenciais de ação e sua relação com os transtornos mentais. No contexto da neurociência contemporânea, essas condições clínicas são compreendidas como manifestações de alterações em circuitos neurais específicos e em mecanismos eletrofisiológicos que afetam diretamente a dinâmica desses impulsos bioelétricos [7]. Entre os transtornos estudados, destacam-se a ansiedade, a depressão e a esquizofrenia, cujas manifestações clínicas mantêm relação estreita com a modulação anormal dos potenciais de ação [7].

A. Disfunções Inibitórias e Hiperexcitabilidade em Transtornos de Ansiedade

Em indivíduos com transtornos de ansiedade, observa-se um padrão de hiperexcitabilidade neuronal, sobretudo em áreas cerebrais relacionadas à detecção e interpretação de estímulos emocionais, como a amígdala e o córtex insular [10]. Essa condição tem sido associada a disfunções no sistema GABAérgico, que exerce papel inibitório essencial na regulação da atividade elétrica cerebral [10].

O ácido gama-aminobutírico (GABA) é o principal neurotransmissor inibitório do sistema nervoso central e atua por meio da ativação de receptores GABA, os quais estão

acoplados a canais de cloreto [10]. Quando ativados, esses canais permitem a entrada de íons negativos na célula, promovendo a hiperpolarização da membrana e reduzindo a probabilidade de disparo dos impulsos elétricos [10]. Entretanto, em estados ansiosos, há evidências de que a eficácia da neurotransmissão GABAérgica encontra-se reduzida, seja pela diminuição da quantidade de GABA, seja por alterações em seus receptores [10]. Como consequência, a inibição é comprometida, favorecendo o surgimento de descargas elétricas excessivas mesmo diante de estímulos com baixa relevância emocional [10].

Esse desequilíbrio eletroquímico, ao reduzir o limiar necessário para a ativação neuronal em circuitos límbicos, contribui diretamente para o desenvolvimento de sintomas típicos da ansiedade, como hipervigilância, reatividade aumentada e percepção exagerada de ameaça [10]. Assim, as disfunções nos impulsos bioelétricos, mediadas por uma falha no controle inibitório do GABA, assumem papel central na fisiopatologia desses transtornos [10].

B. Redução da Atividade Elétrica em Transtornos Depressivos

Nos transtornos depressivos, é comum observar uma diminuição da atividade elétrica em neurônios pertencentes aos sistemas serotoninérgico e noradrenérgico, responsáveis pela regulação do humor, motivação e bem-estar [11]. Esses sistemas são mediados, respectivamente, pelo núcleo da rafe e pelo locus coeruleus — estruturas localizadas no tronco encefálico que liberam os neurotransmissores serotonina e noradrenalina [11]. Em indivíduos com depressão, essas regiões apresentam uma menor frequência dos impulsos que estimulam a liberação desses neurotransmissores [11]. Como consequência, há uma redução na excitação de áreas do cérebro relacionadas ao processamento emocional, como o córtex pré-frontal e o sistema límbico.

Além disso, a depressão frequentemente está associada à ativação persistente do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal (HPA), que regula a resposta ao estresse [11]. Esse estado de hiperatividade leva ao aumento crônico do hormônio cortisol, que por sua vez compromete a condutância elétrica no hipocampo — região crucial para a memória e o controle emocional. Esse comprometimento torna os neurônios menos responsivos, elevando o limiar necessário para o disparo dos impulsos e dificultando a comunicação entre as células nervosas [11].

C. Instabilidade Elétrica e Falhas Sinápticas na Esquizofrenia

A esquizofrenia é caracterizada por padrões desorganizados de atividade elétrica no cérebro, especialmente nos circuitos dopaminérgicos e glutamatérgicos, que são responsáveis pela comunicação entre neurônios por meio dos neurotransmissores dopamina e glutamato, respectivamente [12]. Um dos principais achados neurofisiológicos nessa condição é o aumento da frequência dos impulsos na via dopaminérgica mesolímbica, que conecta a área tegmental ventral ao núcleo accumbens [12]. Essa hiperatividade elétrica está diretamente relacionada aos chamados sintomas positivos da esquizofrenia, como alucinações e delírios [12].

Simultaneamente, observa-se uma disfunção nos receptores NMDA, que são canais iônicos ativados pelo glutamato e responsáveis pela entrada controlada de Ca^{2+} e Na^+ durante a estimulação excitatória [13]. Essa deficiência impede a despolarização sustentada dos interneurônios inibitórios — células que normalmente ajudam a equilibrar a atividade cerebral —, resultando em uma rede neural desinibida e eletricamente instável, especialmente nas áreas corticais envolvidas em funções cognitivas superiores [13].

D. Modulação Hormonal da Excitabilidade Neuronal: O Papel do Eixo HPA

A atividade elétrica no sistema nervoso também é influenciada por hormônios, como o cortisol. Em situações de estresse crônico, a liberação contínua desse hormônio por meio do eixo HPA reduz a excitabilidade elétrica dos neurônios no hipocampo, uma região cerebral importante para a memória e o aprendizado [14]. Isso significa que os neurônios têm mais dificuldade para atingir o limiar necessário para gerar os impulsos elétricos chamados potenciais de ação.

Essa redução da excitabilidade ocorre tanto por modificações nos canais iônicos presentes na membrana celular quanto por alterações na expressão de genes que controlam a passagem de íons, afetando a condução elétrica [14].

Sintetiza-se, de forma comparativa, os mecanismos eletrofisiológicos alterados em diferentes quadros psicopatológicos, com foco nas modificações dos potenciais de ação e suas implicações neurofuncionais, conforme apresentado na Tabela 1.

TABELA 1

Efeitos das Disfunções em Potenciais de Ação nos Transtornos Mentais		
Transtorno / Condição	Alteração nos Potenciais de Ação	Efeito Funcional nos Circuitos Neurais
Transtornos de Ansiedade	Aumento da excitabilidade elétrica na amígdala e no córtex insular	Disparo facilitado de potenciais de ação → respostas emocionais intensificadas mesmo a estímulos neutros
	Redução da ação do sistema GABAérgico	Menor hiperpolarização → maior chance de descargas elétricas desreguladas
Transtornos Depressivos	Diminuição da frequência de potenciais de ação nos neurônios serotoninérgicos e noradrenérgicos	Menor liberação de serotonina e noradrenalina → redução na ativação de áreas ligadas ao humor e motivação
	Aumento do cortisol por ativação do eixo HPA	Redução da condutância no hipocampo → neurônios mais lentos e menos responsivos
	Hiperatividade dos potenciais de ação na via dopaminérgica mesolímbica	Estímulo excessivo do núcleo accumbens → surgimento de alucinações e delírios (sintomas positivos)
Esquizofrenia	Disfunção dos receptores NMDA (glutamatérgicos)	Falha na ativação de interneurônios inibitórios → desinibição e instabilidade elétrica cortical
	Exposição prolongada ao cortisol reduz a excitabilidade de neurônios no hipocampo	Aumento do limiar para potenciais de ação → prejuízos na memória, no aprendizado e na regulação emocional
Ativação Crônica do Eixo HPA		

Dessa forma, observa-se que os transtornos mentais estão intrinsecamente relacionados a alterações na geração, propagação e modulação dos potenciais de ação nos neurônios. Tais disfunções elétricas comprometem diretamente a comunicação sináptica, afetando os circuitos neurais responsáveis pelo processamento cognitivo, emocional e comportamental. Nesse contexto, compreender os mecanismos bioelétricos subjacentes a essas condições torna-se fundamental para o avanço no diagnóstico e no desenvolvimento de tratamentos mais eficazes para os transtornos neuropsiquiátricos.

E. Alterações nas Bandas de Frequência Cerebral em Transtornos Mentais

Complementarmente às alterações nos potenciais de ação, os transtornos mentais também se caracterizam por padrões disfuncionais nas frequências das oscilações cerebrais, identificadas por meio da eletroencefalografia. Essas oscilações, organizadas em bandas de frequência, refletem o comportamento coletivo de populações neuronais e oferecem uma perspectiva adicional e relevante para a compreensão dos correlatos eletrofisiológicos das disfunções mentais.

Para aprofundar essa análise, a atividade elétrica cerebral pode ser estudada por meio da decomposição espectral dos sinais eletroencefalográficos, revelando diferentes bandas de frequência associadas a estados fisiológicos, cognitivos e emocionais. As principais bandas — delta, theta, alpha, beta e gamma — representam padrões oscilatórios específicos e têm sido amplamente investigadas em pesquisas sobre saúde mental. Suas respectivas faixas de frequência e formas de onda características estão representadas de forma esquemática na Fig. 11.

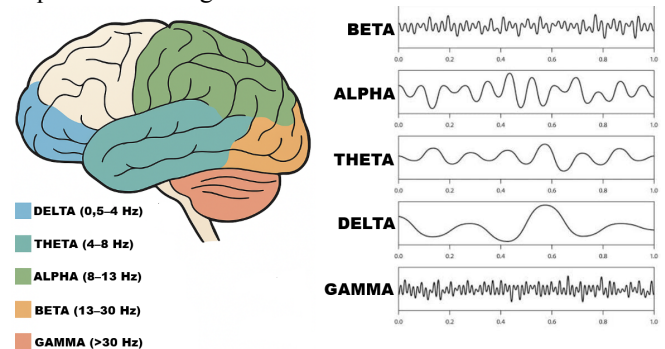


Fig. 11. Bandas cerebrais por frequência (Hz) e suas regiões predominantes no cérebro [15].

A banda delta (0,5–4 Hz), comumente associada ao sono profundo e à recuperação neural, tende a ser atípica quando predominante durante a vigília. Nesses casos, pode indicar um comprometimento global da função cerebral, frequentemente relacionado a causas neurológicas ou metabólicas. Evidências apontam que indivíduos com transtorno depressivo maior apresentam aumento na atividade das bandas de baixa frequência, como delta e theta, mesmo em estado de repouso. Tal padrão está relacionado à lentificação dos processos cognitivos e a déficits nas funções executivas, atribuídos, em grande parte, à disfunção do córtex pré-frontal — área essencial para o controle

atencional, planejamento e regulação do comportamento [16].

A banda theta (4–8 Hz) está associada a estados de sonolência, relaxamento profundo e à atividade mental voltada para processos internos, como a imaginação. Em condições normais, sua atividade tende a predominar durante o repouso ou a transição entre vigília e sono. No entanto, estudos com EEG em repouso indicam que a presença acentuada dessa banda durante a vigília, especialmente nas regiões frontal e temporal do cérebro, pode refletir alterações funcionais em contextos psicopatológicos. Em indivíduos com transtorno depressivo maior, observa-se um aumento significativo da potência theta nesses locais, o que está relacionado à diminuição da atividade cortical e à presença de sintomas como apatia, lentificação cognitiva e perda de iniciativa. Já em casos de transtornos de ansiedade, embora a distribuição seja distinta, alterações em theta também aparecem, podendo estar associadas à intensificação de pensamentos repetitivos negativos e à ativação de circuitos límbicos implicados na resposta ao estresse e à ameaça, como o hipocampo e a amígdala [17].

A banda alpha (8–13 Hz) é uma das mais estudadas no EEG e está relacionada a estados de vigília tranquila, ou seja, quando o indivíduo está acordado, com os olhos fechados e em repouso mental. Ela exerce papel fundamental na atenção sustentada — capacidade de manter o foco por períodos prolongados — e na inibição sensorial, que permite ao cérebro filtrar estímulos irrelevantes para manter a concentração [18]. Estudos indicam que, em indivíduos com transtorno de ansiedade generalizada, há uma redução da atividade alpha, principalmente nas regiões frontais e centrais do cérebro. Esse padrão sugere uma dificuldade do sistema nervoso em atingir estados de relaxamento, mantendo-se em alerta constante, mesmo na ausência de estímulos ameaçadores. Com isso, o cérebro apresenta menor capacidade de modulação sensorial, contribuindo para uma sensação de sobrecarga mental e aumento da tensão fisiológica [18].

A banda beta (13–30 Hz) está associada à atenção ativa, pensamento lógico e resolução de problemas. Em contextos clínicos, uma elevação da atividade beta — especialmente nas regiões frontais — pode ser um indicativo de transtornos ansiosos, caracterizando um estado de hipervigilância. Por outro lado, em quadros depressivos, observa-se uma redução da atividade beta, relacionada à lentificação cognitiva e à diminuição da iniciativa e da motivação [19].

A banda gamma (>30 Hz) é a faixa de frequência mais alta registrada em exames de EEG e está associada a funções cognitivas superiores, como memória de trabalho, atenção consciente e integração sensorial. A memória de trabalho refere-se à capacidade de manter e manipular informações por curtos períodos, enquanto a integração sensorial diz respeito ao processamento simultâneo de estímulos diversos para formar percepções coerentes. Essa banda desempenha papel crucial na sincronização funcional entre diferentes áreas do cérebro, permitindo respostas cognitivas rápidas e coordenadas, essenciais para atividades como raciocínio lógico, linguagem e percepção consciente [20].

Em pessoas com esquizofrenia, observa-se uma redução na coerência e na potência da banda gamma, principalmente

durante tarefas que exigem esforço cognitivo. Essa alteração sugere uma quebra na comunicação entre redes neurais, prejudicando a formação de pensamentos organizados e contribuindo para sintomas como alucinações auditivas e discurso desorganizado. Essas disfunções parecem estar ligadas a falhas nos mecanismos de excitação e inibição sináptica mediados por neurotransmissores como o glutamato e o GABA, afetando diretamente a geração e manutenção da atividade gamma [20]. Esses achados sustentam a hipótese de que essa banda possa servir como um biomarcador eletrofisiológico relevante para o diagnóstico e monitoramento de transtornos psicóticos.

A análise das bandas cerebrais por meio de exames como o EEG permite identificar padrões disfuncionais de atividade elétrica cerebral relacionados a diferentes transtornos mentais. Essa abordagem contribui significativamente para o diagnóstico diferencial e para o desenvolvimento de estratégias terapêuticas mais específicas, promovendo uma compreensão mais precisa das bases neurofisiológicas envolvidas no sofrimento psíquico.

IV. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS CEREBRAIS

A. Fundamentos e Objetivos do Processamento Digital de Sinais Cerebrais

O processamento digital de sinais cerebrais compreende a aquisição, análise e interpretação computacional de sinais elétricos gerados pela atividade neural [21]. O principal objetivo dessa técnica é extrair informações relevantes da atividade cerebral para aplicações clínicas, de reabilitação motora, no diagnóstico de doenças e no desenvolvimento de interfaces cérebro-computador. Destacam-se, especialmente, os sistemas que operam em tempo real, os quais integram conhecimentos neurobiológicos com ferramentas computacionais avançadas [21].

Além disso, a utilização de métodos matemáticos, como a filtragem digital, as transformadas de Fourier e os algoritmos multirresolução, permitem converter os sinais cerebrais em dados quantificáveis e mapeáveis [22]. Esses recursos possibilitam a identificação de padrões cerebrais e disfunções neurológicas, como focos epiléticos, contribuindo significativamente para o aprimoramento de sistemas de diagnóstico e monitoramento cerebral [22].

B. Técnicas e Equipamentos para Registro de Sinais Cerebrais

Para compreender as vantagens e limitações dos equipamentos utilizados na análise de sinais cerebrais, é importante distinguir dois conceitos fundamentais: resolução temporal e resolução espacial.

A resolução temporal refere-se à capacidade de um equipamento detectar variações na atividade elétrica com precisão ao longo do tempo, ou seja, o quanto rapidamente ele consegue registrar mudanças nos sinais neurais, geralmente em escala de milissegundos (ms). Essa característica é essencial para acompanhar a dinâmica da atividade cerebral em tempo real [23].

Já a resolução espacial está relacionada à capacidade de identificar com exatidão o local ou região do cérebro onde o

sinal tem origem. Quanto maior a resolução espacial, mais preciso será o mapeamento das áreas ativadas durante diferentes funções cognitivas ou motoras [23].

Ambas as resoluções são determinantes na escolha da técnica mais adequada para aplicações clínicas ou de pesquisa, pois definem o tipo de informação que pode ser obtida sobre a atividade cerebral [23]. A seguir, apresentam-se os principais sistemas empregados na análise dos sinais neurais:

1) *Eletroencefalograma (EEG)*: É um método não invasivo amplamente empregado para o registro da atividade elétrica cerebral por meio de eletrodos posicionados no couro cabeludo [24]. Essa técnica permite a captação de oscilações elétricas originadas da soma da atividade sináptica de grandes populações neuronais, caracterizando-se por sua elevada resolução temporal. Além disso, sua acessibilidade e o baixo custo operacional contribuem para sua ampla aplicação tanto em contextos clínicos quanto em pesquisas científicas [25].

Apesar dessas vantagens, o EEG apresenta limitações importantes, como a baixa resolução espacial, que dificulta a localização precisa de fontes neurais mais profundas. Ademais, o sinal registrado é suscetível a interferências externas, como artefatos decorrentes de movimentos musculares e ruídos eletromagnéticos, o que pode comprometer a qualidade dos dados obtidos. Nesse contexto, um registro visual da aplicação prática do exame de EEG, exemplificando a configuração típica do procedimento, é apresentado na Fig. 12.

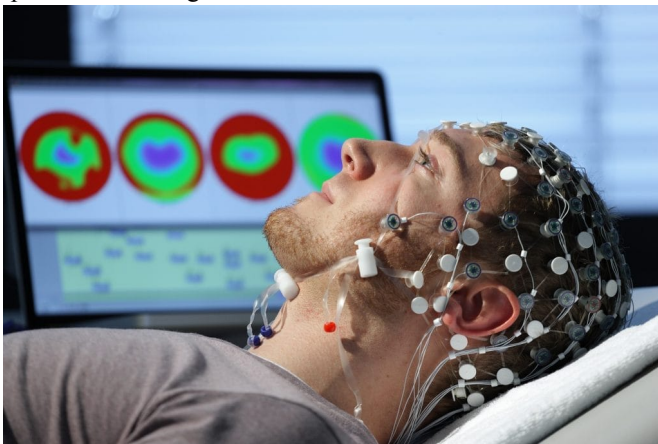


Fig. 12. Registro de exame de EEG com uso de touca de múltiplos eletrodos, conectado a sistema de aquisição e visualização dos sinais cerebrais [26].

Na prática, o EEG depende de cadeias de aquisição e amplificação de sinais que envolvem componentes eletrônicos sensíveis, o que o aproxima, em termos estruturais, de sistemas automatizados utilizados na indústria, especialmente no que tange à captação, filtragem e transmissão de sinais de baixa amplitude.

2) *Magnetoencefalografia (MEG)*: A neuroimagem compreende um conjunto de técnicas que possibilitam a visualização e o estudo da estrutura e função do sistema nervoso, fornecendo informações essenciais sobre a atividade cerebral em diferentes contextos. Nesse cenário, a

magnetoencefalografia (MEG) destaca-se como uma técnica que registra os campos magnéticos gerados pelas correntes elétricas neuronais, apresentando elevada resolução espacial e temporal [27]. Tal característica torna a MEG especialmente eficaz na localização de atividades elétricas em regiões corticais, inclusive em áreas profundas do cérebro, com maior precisão do que o EEG.

Na prática clínica, a MEG é amplamente empregada para o mapeamento funcional cerebral e no estudo da epilepsia, além de ser uma ferramenta valiosa em pesquisas neurocientíficas [28]. Entretanto, o alto custo do equipamento, a necessidade de ambientes com blindagem magnética adequada e a complexidade dos processos de aquisição e análise limitam sua aplicação a centros de pesquisa e instituições altamente especializadas [29]. A representação de um exame de magnetoencefalografia pode ser observada na Fig. 13.



Fig. 13. Exame de magnetoencefalografia (MEG) sendo realizado em equipamento de aquisição de sinais magnéticos cerebrais, com o indivíduo posicionado em repouso [30].

O registro dos sinais cerebrais na MEG é realizado por meio de sensores supercondutores altamente sensíveis, denominados SQUIDS (*Superconducting Quantum Interference Devices*). Estes dispositivos detectam flutuações magnéticas extremamente pequenas — da ordem de 10^{-15} — e operam em temperaturas criogênicas para preservar a supercondutividade, garantindo elevada sensibilidade [31]. A integração dos SQUIDS com sistemas de aquisição e *softwares* avançados exemplifica os princípios da automação moderna, nos quais a sincronização entre *hardware* e *software* é fundamental para o controle preciso de processos sensíveis, análogos aos encontrados em linhas de produção automatizadas e ambientes industriais controlados.

3) *Interfaces Cérebro-Computador (BCIs)*: As interfaces cérebro-computador (do inglês *Brain-Computer Interfaces* – BCIs) consistem em sistemas que estabelecem uma via de comunicação direta entre o cérebro humano e dispositivos externos, dispensando comandos motores. De modo geral, essas interfaces utilizam sinais neurais captados por meio da eletroencefalografia (EEG) e os convertem em comandos capazes de controlar, por exemplo, cadeiras de rodas, próteses e sistemas computacionais. Tais tecnologias têm se

mostrado relevantes no auxílio à comunicação e à mobilidade de indivíduos com deficiências motoras severas, promovendo maior autonomia funcional [32]. A literatura também evidencia o potencial das BCIs tanto no contexto da reabilitação quanto na ampliação da interação homem-máquina [32].

Um exemplo prático da aplicação das BCIs na reabilitação motora é ilustrado na Fig. 14, que apresenta o uso do EEG para captação de sinais neurais relacionados à imagética motora — ou seja, à atividade cerebral associada à simulação mental de movimentos, sem que haja execução física —, integrados ao controle de um dispositivo robótico assistivo.



Fig. 14. Exemplo de BCI aplicada à reabilitação motora, com EEG, imagética motora e controle de dispositivo robótico assistivo [33].

No cenário nacional, observam-se avanços na aplicação de algoritmos voltados ao reconhecimento de padrões cerebrais, como o uso de redes neurais auto-organizadoras em BCIs baseadas em eletroencefalografia, que têm apresentado resultados promissores na interpretação de sinais em tempo real [34]. Esse tipo de rede faz parte dos chamados algoritmos de aprendizado não supervisionado, que conseguem organizar grandes volumes de dados em mapas bidimensionais. Nesses mapas, informações com características parecidas ficam próximas umas das outras, o que ajuda a identificar padrões e a destacar informações importantes dos sinais cerebrais, mesmo sem a necessidade de rótulos ou classificações prévias [35].

Esses progressos estão diretamente relacionados ao desenvolvimento e à sofisticação dos componentes eletrônicos envolvidos no funcionamento das BCIs. As interfaces cérebro-computador dependem de uma cadeia eletrônica complexa para captar, processar e interpretar os sinais elétricos gerados pela atividade cerebral. Inicialmente, os eletrodos de EEG, dispostos no couro cabeludo, capturam sinais neurais que apresentam amplitudes muito reduzidas, tipicamente na ordem de microvolts (μV), sendo altamente suscetíveis a ruídos e interferências externas, como atividade muscular, movimentos oculares e campos eletromagnéticos [6].

Para assegurar a integridade desses sinais, a primeira etapa consiste na amplificação analógica por meio de amplificadores de alta impedância e baixo ruído, que ampliam o sinal cerebral sem comprometer sua qualidade. Esse processo é essencial para mitigar interferências e garantir uma base confiável para as etapas subsequentes [23].

Em seguida, o sinal passa por filtros analógicos e digitais que eliminam frequências indesejadas — sejam artefatos fisiológicos, ruídos ambientais ou interferência da rede elétrica (50/60 Hz). Normalmente, emprega-se filtragem passa-banda entre 0,5 Hz e 40 Hz, faixa correspondente às bandas cerebrais de interesse [36].

A conversão analógico-digital (A/D) é uma etapa crítica no fluxo eletrônico, responsável pela digitalização dos sinais analógicos com alta resolução e frequência de amostragem, viabilizando sua aplicação em dispositivos portáteis e de baixo consumo [36].

Com o sinal digitalizado, aplicam-se etapas de pré-processamento para refinar os dados coletados, utilizando técnicas como filtragem adaptativa e análise de componentes independentes (ICA) para remoção de artefatos residuais, especialmente os musculares e oculares [37]. Posteriormente, ocorre a extração de características, identificando padrões no sinal — como potências espectrais, coeficientes estatísticos e comportamentos temporais — frequentemente com o auxílio de filtros espaciais e métricas estatísticas [36].

A interpretação final dos sinais é realizada por algoritmos de aprendizado de máquina, como redes neurais profundas e classificadores supervisionados. A eficácia e a agilidade deste processamento impactam diretamente a experiência do usuário, sobretudo em aplicações de tempo real [38]. No contexto da automação industrial, a integração entre BCIs e sistemas de controle digital, como controladores lógicos programáveis (CLPs) e interfaces homem-máquina (IHMs), é tecnicamente viável a partir do uso de sistemas embarcados de aquisição e processamento em tempo real, conforme demonstrado em estudos sobre arquitetura de *hardware* para EEG [39].

Apesar dos avanços, as interfaces cérebro-computador não invasivas ainda enfrentam limitações importantes, como a baixa relação sinal-ruído dos registros — isto é, quando os sinais de interesse estão misturados a ruídos ou interferências, dificultando sua identificação —, além da variabilidade entre diferentes usuários e sessões, o que compromete a generalização dos modelos. Tais desafios exigem algoritmos mais robustos e adaptáveis, capazes de lidar com mudanças nas distribuições dos dados ao longo do tempo e entre indivíduos [40].

4) Eletrocorticografia e Estereoletroencefalografia: Os métodos invasivos de registro de sinais cerebrais são técnicas que permitem mapear com alta precisão áreas específicas do cérebro, proporcionando informações detalhadas sobre a atividade neural. A eletrocorticografia (ECoG) consiste na colocação direta de eletrodos sobre a superfície do córtex cerebral, o que possibilita a captação de sinais elétricos com maior resolução espacial e temporal do que métodos não invasivos. A ilustração didática dessa técnica é apresentada na Fig. 15.



Fig. 15. Representação esquemática da eletrocorticografia (ECoG) [41].

Já a eletroencefalografia estereotáxica (sEEG) envolve a implantação de eletrodos em regiões subcorticais, permitindo o monitoramento de estruturas cerebrais mais profundas, muitas vezes inacessíveis por outras técnicas. A técnica é representada por uma ilustração didática, disponível na Fig. 16.

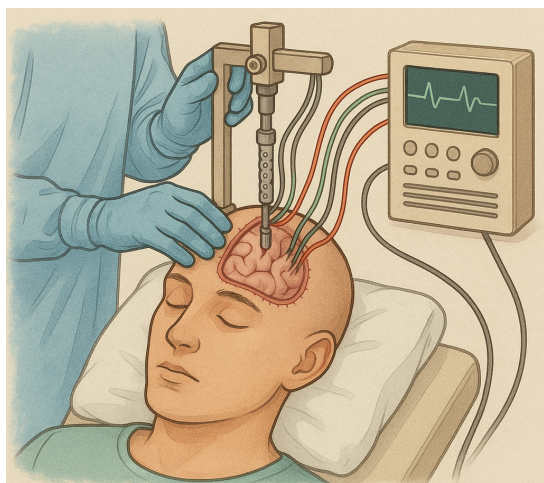


Fig. 16. Representação esquemática da eletrocorticografia estereotáxica (sEEG) [42].

Ambas abordagens são especialmente valiosas em contextos clínicos, como no mapeamento pré-cirúrgico de pacientes com epilepsia resistente a medicamentos, onde é fundamental identificar com precisão as áreas epileptogênicas para orientar intervenções cirúrgicas [43].

Entretanto, esses métodos apresentam limitações relevantes que restringem seu uso a contextos clínicos específicos. Por se tratarem de procedimentos invasivos, há riscos inerentes, como infecção, sangramentos intracranianos e possíveis lesões ao tecido neural, requerendo infraestrutura especializada e protocolos rigorosos. Além disso, os custos elevados e a necessidade de monitoramento contínuo durante a coleta dos dados tornam tais técnicas aptas somente quando os benefícios superam os riscos, como em pacientes com

epilepsia refratária submetidos a mapeamento pré-cirúrgico [44].

Nesse cenário, tecnologias e métodos oriundos da automação industrial — como controladores programáveis, sistemas supervisórios e protocolos de comunicação — vêm sendo progressivamente incorporados ao ambiente hospitalar, favorecendo a automação de rotinas críticas, a integração de sistemas e o monitoramento remoto de equipamentos, com foco na eficiência e na segurança operacional [45]. Essa convergência entre automação e tecnologia médica representa uma oportunidade concreta de atuação para profissionais formados em automação industrial, especialmente em setores que demandam precisão, confiabilidade e controle em tempo real, como os centros cirúrgicos e os laboratórios de neuroengenharia.

Além disso, o uso de sistemas embarcados — dispositivos eletrônicos compactos com inteligência embarcada — tem se mostrado promissor na coleta e no processamento de sinais biomédicos, especialmente em aplicações com restrições de espaço físico e em que a latência precisa ser mínima. Esses dispositivos podem operar de forma autônoma, realizando registros e transmissões de sinais cerebrais com alta precisão e baixa latência, possibilitando análise em tempo real e integração com algoritmos que ajustam variáveis do sistema de forma dinâmica, como observado em próteses neurais fechadas com processamento “on-chip” — ou seja, realizado diretamente no próprio chip do dispositivo, sem necessidade de envio dos dados para computadores externos, o que reduz significativamente a latência e o consumo de energia [46].

Com o objetivo de facilitar a comparação entre os diferentes equipamentos abordados, a Tabela II reúne de forma sintética as principais características de cada método, evidenciando aspectos técnicos e aplicações clínicas que orientam a escolha da técnica mais apropriada conforme a finalidade desejada.

TABELA II

Comparação entre Métodos de Registro de Sinais Cerebrais: Características Técnicas e Aplicações					
Equip.	Invasivo	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Aplicações	Limitações
EEG	Não	Alta	Baixa	Diagnóstico clínico	Ruídos
MEG	Não	Alta	Média/ Alta	Mapeamento funcional	Blindagem
BCIs	Não	Alta	Depende do método	Reabilitação, controle assistivo	Algoritmos complexos
ECoG	Sim	Alta	Alta	Mapeamento cortical	Risco cirúrgico
sEEG	Sim	Alta	Alta	Mapeamento profundo	Risco cirúrgico

Os equipamentos e métodos discutidos ao longo desta seção não apenas evidenciam os avanços na análise de sinais cerebrais, mas também revelam o papel fundamental da automação industrial no suporte a esses sistemas. A cadeia de aquisição, processamento e interpretação dos sinais neurais depende de tecnologias consolidadas da automação, como sensores de alta precisão, circuitos eletrônicos integrados, protocolos de comunicação, sistemas embarcados e algoritmos de controle digital. Seja na amplificação de

tensões pequenas no EEG, na operação de sensores supercondutores na MEG ou na sincronização entre *hardware* e *software* nas BCIs, os princípios da automação estão intrinsecamente presentes, garantindo confiabilidade, precisão e eficiência.

Além da importância estrutural dos dispositivos, destaca-se o avanço contínuo dos algoritmos computacionais aplicados ao processamento digital de sinais cerebrais. Essas técnicas têm permitido transformar dados brutos em informações clínicas e funcionais com elevado grau de precisão, especialmente no contexto das BCIs e do diagnóstico neurológico.

Entre os métodos tradicionais, evidenciam-se as máquinas de vetores de suporte (SVMs) que classificam os sinais neurais, separando-os em grupos distintos [47]. Também destacam-se as redes neurais artificiais, que conseguem identificar relações complexas entre estímulos e respostas cerebrais, ajudando na classificação e reconhecimento de padrões [47].

Nos últimos anos, métodos baseados em aprendizado profundo (*deep learning*) têm se destacado como abordagens promissoras para classificação de sinais neurais, já que conseguem extrair automaticamente características relevantes de EEG, mesmo em cenários com baixa relação sinal-ruído e alta variabilidade entre usuários e sessões [48].

Além disso, técnicas baseadas em inteligência artificial têm ganhado destaque na análise de sinais eletroencefalográficos, com especial ênfase nas redes generativas adversariais (GANs). Essas redes são compostas por dois módulos neurais — um gerador, responsável por criar dados sintéticos, e um discriminador, encarregado de distinguir entre dados reais e gerados — que operam em um sistema competitivo para aperfeiçoar mutuamente suas funções. Essa dinâmica de treinamento permite às GANs produzir sinais sintéticos com alto grau de realismo, refletindo com precisão características temporais e espectrais dos sinais cerebrais originais [49].

No contexto das interfaces cérebro-computador (BCIs), particularmente nas aplicações envolvendo imagética motora, o uso de GANs tem se mostrado altamente promissor. Ao possibilitar a expansão de conjuntos de dados rotulados, essas redes contribuem para mitigar o problema da escassez de dados em experimentos com EEG, além de melhorar a robustez e a acurácia dos algoritmos de classificação. Estudos recentes demonstram que as GANs podem ser utilizadas não apenas para geração de dados sintéticos, mas também para reconstrução de sinais danificados, remoção de ruído e adaptação de domínios entre diferentes usuários ou sessões. Tais avanços são especialmente relevantes em sistemas online e em tempo real, nos quais a qualidade do sinal impacta diretamente o desempenho e a responsividade da interface [49].

Cabe destacar que tais algoritmos não se limitam ao uso em BCIs. Eles são amplamente empregados em sinais obtidos por meio de EEG clínico, MEG, ECoG e sEEG, demonstrando adaptabilidade e escalabilidade em diferentes modalidades de registro. Essa convergência entre neuroengenharia, ciência de dados e automação industrial fortalece o desenvolvimento de sistemas inteligentes mais responsivos e precisos — como próteses neurais que se

adaptam em tempo real à intenção motora do usuário, softwares diagnósticos capazes de identificar padrões sutis em sinais cerebrais e dispositivos de reabilitação que ajustam automaticamente sua atuação com base na resposta neuromuscular do paciente —, contribuindo de forma significativa para a reabilitação motora, a detecção precoce de disfunções neurológicas e a ampliação da interface homem-máquina.

V. CONSIDERAÇÕES

O presente artigo teve como objetivo principal analisar o estado da arte das tecnologias de processamento de sinais neurais, com ênfase na automação industrial como base tecnológica essencial para sua aplicação e evolução. A partir de uma abordagem teórico-conceitual fundamentada em revisão bibliográfica, discutiram-se os princípios da neurobiologia, a dinâmica eletrofisiológica dos neurônios e os impactos das disfunções nos potenciais de ação em diferentes transtornos mentais.

Foram também analisados os principais métodos de aquisição de sinais cerebrais, incluindo eletroencefalograma (EEG), magnetoencefalografia (MEG), eletrocorticografia (ECoG), eletroencefalografia estereotáxica (sEEG) e interfaces cérebro-computador (BCIs). Observou-se que essas tecnologias dependem de cadeias estruturadas de aquisição, processamento e interpretação de sinais, nas quais se aplicam diretamente os princípios da automação industrial, como o uso de sensores, amplificadores, filtros, conversores analógico-digitais, sistemas embarcados e algoritmos de controle.

Assim, verifica-se que a automação industrial apresenta elevado potencial de contribuição para o avanço das neurotecnologias, especialmente na integração entre *hardware* e *software*, na confiabilidade de sistemas em tempo real e na automação de processos biomédicos complexos. Nesse cenário, tecnólogos da área encontram um campo emergente e multidisciplinar de atuação, que envolve desde o suporte técnico em ambientes hospitalares até o desenvolvimento de soluções voltadas à reabilitação motora e acessibilidade assistiva.

A convergência entre automação industrial e neuroengenharia promove não apenas avanços tecnológicos, mas também impactos sociais relevantes, ao possibilitar maior inclusão, diagnóstico precoce e melhora na qualidade de vida de indivíduos com disfunções neurológicas. Essa interdisciplinaridade reforça a importância da formação técnica aplicada e evidencia o papel do tecnólogo como agente inovador em contextos que demandam soluções integradas e de alta complexidade.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo analisou, com base em fundamentos neurobiológicos e computacionais, o processamento digital de sinais cerebrais e sua aplicação em contextos clínicos, diagnósticos e de reabilitação, evidenciando a automação industrial como pilar tecnológico fundamental. Por meio da revisão bibliográfica, foi possível compreender como os potenciais de ação e as sinapses interferem no funcionamento

do sistema nervoso central, bem como sua correlação com transtornos neuropsiquiátricos.

Foram apresentadas diferentes tecnologias de aquisição e análise de sinais neurais — como EEG, MEG, ECoG, sEEG e BCIs — destacando suas características técnicas, aplicações e limitações. Verificou-se que esses sistemas operam com componentes e princípios amplamente utilizados na automação industrial, incluindo sensores de precisão, amplificadores, filtros, protocolos de comunicação e algoritmos computacionais.

Conclui-se que a integração entre automação industrial e neuroengenharia representa um campo promissor para o desenvolvimento de tecnologias assistivas e biomédicas mais eficientes, seguras e acessíveis. A atuação de tecnólogos nesse contexto reforça a importância da formação técnica aplicada e da atuação interdisciplinar na resolução de desafios complexos.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se o aprofundamento de estudos voltados à aplicação prática dessas tecnologias em ambientes clínicos, bem como a investigação de estratégias para integração eficiente entre plataformas industriais e sistemas biomédicos, considerando aspectos de segurança, usabilidade e viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- [1] ARRUDA, H. C. G. Classificação de sinais de EEG: uma abordagem da visão computacional com redes neurais convolucionais para predição de crises epiléticas. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023. Dissertação (Mestrado em Psicobiologia) – UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/fbc04c5f-332e-45c8-bfa0-072cfeea3278>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [2] MANIEZZO, Giovanni Vallim; OLIVEIRA, Jorge Luiz Arantes de; PEREIRA, Maria Eduarda Riskalla. *Processamento e classificação de sinais de EEG por meio de machine learning para identificação de emoções básicas*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/33611>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [3] DI BATTISTA, E. G. Processamento e classificação do EEG visando a identificação do estado mental com aplicações em neurofeedback. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – UNESP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/4faeb5d4-9c9b-42f7-9c9e-c56eb1832687>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [4] PAULA, P. O. de; GIULIANI, H. L. V.; FANTINATO, D. G. Gráficos de recorrência para classificação de sinais de EEG usando aprendizado profundo. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E COMPUTAÇÃO APLICADA – ERCAS, 2021. Anais [...]. São Paulo: Sociedade Brasileira de Computação, 2021. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/ercas/article/view/17437>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [5] ALMEIDA, W. F. de; LIMA, C. A. M. de. Técnicas de aprendizado de máquina para interfaces cérebro-computador baseadas em EEG. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2021. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100131/td-e-20062021-211101/pt-br.php>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [6] SADIYA, S.; ALHANAI, T.; GHASSEMI, M. Artifact Detection and Correction in EEG Data: A Review. 2021. arXiv preprint. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2106.13081>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [7] BEAR, Mark F. et al. *Neurociências: desvendando o sistema nervoso* [recurso eletrônico]. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. Tradução: Carla Dalmaz et al. Revisão técnica: Carla Dalmaz; Jorge Alberto Quillfeldt; Maria Elisa Calcagnotto. ISBN 978-85-8271-433-1.
- [8] LENT, Roberto. *Cem bilhões de neurônios? Conceitos fundamentais de neurociência*. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2010. Disponível em: <https://dn720200.ca.archive.org/0/items/cem-bilhoes-de-neuronios-roberto-lent-2aed/Cem%20Bilh%C3%B5es%20de%20Neur%C3%B4nios%20-%20Roberto%20Lent%20-%20202%C2%AAed.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [9] LUMEN LEARNING (LibreTexts). *Chemical and Electrical Synapses*. In: Biology for Majors II. [s.d.]. Disponível em: https://bio.libretexts.org/Courses/Lumen_Learning/Biology_for_Majors_II_%28Lumen%29/17%3A_Module_14-_The_Nervous_System/17.11%3A_Chemical_and_Electrical_Synapses. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [10] MÖHLER, Hanns. O sistema GABA na ansiedade e depressão e seu potencial terapêutico. *Neuropharmacology*, v. 62, n. 1, p. 42–53, 2012. Tradução técnica disponível em bases acadêmicas. Resumo em inglês: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21889800>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- [11] BELMAKER, R. H. et al. Transtorno depressivo maior. *The New England Journal of Medicine*, v. 358, n. 1, p. 55–68, 2008. Resumo em português disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Transtorno_depressivo_maior. Acesso em: 12 jun. 2025.
- [12] KANDEL, Eric R. *Princípios de neurociência*. 5. ed. Rio de Janeiro: AMGH, 2014. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/584976069/Kandel-Principios-de-Neurociencias?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 12 jun. 2025.
- [13] LISMAN, John E. et al. Estrutura de circuitos para entender interações entre neurotransmissores e genes de risco na esquizofrenia. *Trends in Neurosciences*, v. 31, n. 5, p. 234–242, 2008. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2680493/pdf/nihms103297.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- [14] McEWEN, Bruce S. O cérebro sob estresse: implicações para a saúde mental e física. *Revista de Psiquiatria Clínica*, São Paulo, v. 34, supl. 1, p. 9–19, 2007. Disponível em:

- https://njc.rockefeller.edu/pdf2/McEwenPhysioRev07.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 12 jun. 2025.
- [15] RIBEIRO, Eduarda Hoerlle. *Representação das bandas cerebrais e suas localizações*. 2025. Elaboração da autora.
- [16] NEWSON, Jennifer J.; THIAGARAJAN, Tilak C. Resting EEG in psychiatric disorders: a review. *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 12, p. 521, 2018. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/human-neuroscience/articles/10.3389/fnhum.2018.00521/full>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [17] YANG, X.; et al. A rhythm difference comparison between major depressive disorder and anxiety disorder in resting-state EEG. *Journal of Neuropsychiatry*, v. X, p. –, 2022 (Publicação online em PMC9381950). Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9381950/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [18] FONSECA, L. C. da et al. *Análise das bandas do EEG em indivíduos com transtorno de ansiedade generalizada*. Revista de Psiquiatria Clínica, v. 46, n. 2, p. 43–49, 2019.
- [19] SILVA, D. C.; CUNHA, A. M. da. *Análise das bandas beta em adultos com sintomas depressivos: estudo comparativo por EEG*. Revista Saúde & Ciência, v. 9, n. 4, p. 58–66, 2018. Disponível em: <https://rsc.revistas.ufcg.edu.br/index.php/rsc/article/view/453>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [20] LIMA, P. D.; SOUZA, G. S. de. *Correlação entre atividade gama e sintomas cognitivos na esquizofrenia: uma revisão sistemática*. Revista Neurociências, v. 28, n. 1, p. 74–82, 2020. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/neurociencias/issue/view/725>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [21] MELO, Gabriel Chaves de. *Análise de sinais de eletroencefalograma para Interface Cérebro-Computador visando aplicação em reabilitação motora*. Tese (Doutorado)—Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-22082023-075818/pt-br.php>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [22] TEDESCHI, Walfred. *Novos métodos em processamento de sinais cerebrais: aplicações em eletroencefalografia e ressonância magnética funcional*. 2004. Tese (Doutorado)—Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59135/tde-27052004-160210/pt-br.php>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [23] HUGEN, Julian Roosen Runge. *Implantação da avaliação da dinâmica temporal e espacial de processos neurais na eletroencefalografia*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas)—Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/182040>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [24] MILLOT, J.-L. *Fundamentos da medição do EEG: uma introdução*. In: *Seminário de Eletrônica e Automação*, Ponta Grossa (PR), 2016. Anais... UTFPR, 2016.
- [25] NIEDERMEYER, E.; DA SILVA, F. L. *Eletroencefalografia: princípios básicos, aplicações clínicas e campos relacionados*. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2020.
- [26] CENTRO MÉDICO DRA. ELIANE. Eletroencefalograma (EEG) [imagem]. Disponível em: <https://centromedicodraeliane.com.br/eletroencefalograma-a-eeeg/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [27] HAMALAINEN, 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, 1993. Disponível em: <https://megcore.nih.gov/images/8/88/1993-Hamalainen-RMP.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [28] MANDAL, R. et al. Magnetoencefalografia na prática clínica. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, v. 80, n. 5, p. 345–354, 2022.
- [29] BAILLET, S. Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging. *Nature Neuroscience*, v. 20, p. 327–339, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nn.4504>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [30] RADIOLOGY BR. Magnetoencefalografia (MEG): novo método de colheita de imagens médicas [imagem]. Disponível em: <https://radiologybr.wordpress.com/2013/03/09/magnetoencefalografia-meg-novo-metodo-de-colheita-de-imagens-medicas/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [31] CLARKE, John; BRAGINSKI, Alex I. *The SQUID Handbook*, vol. 1. Wiley-VCH, 2004.
- [32] NASSER, Layla R.; SCHALK, Gerwin. Interfaces cérebro-computador: princípios, desenvolvimento e aplicações. *Nature Reviews Bioengineering*, v. 1, p. 19–33, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s44222-021-00004-7>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [33] OPENAI. *Imagem gerada por inteligência artificial representando uma aplicação clínica de BCI na reabilitação motora*. ChatGPT, 2025. Imagem criada com auxílio da ferramenta DALL-E. Disponível em: <https://chat.openai.com>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [34] BUENO, Lucas Batista. *Interface cérebro-computador baseada em EEG utilizando redes neurais auto-organizadoras*. 2017. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/9689>. Acesso em: 15 jun. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/items/c1a18269-bad7-4c30-a5f1-24e29659c310>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [35] KOHONEN, T. *Self-organizing maps*. 3. ed. Berlin: Springer, 2001.
- [36] ZHOU, H. et al. A review on direct digital conversion techniques for biomedical signal acquisition. *Electronics*, v. 12, n. 12, p. 2676, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/12/2676>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [37] BONO, V.; DAS, S.; JAMAL, W.; MAHARATNA, K. Hybrid Wavelet and EMD/ICA approach for artifact suppression in pervasive EEG. *arXiv preprint*, 2018.

- Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1803.00053>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [38] WANG, Y. et al. Review of Deep Representation Learning Techniques for BCI. *arXiv preprint*, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2405.19345>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [39] MIRANDA, S. et al. BEATS: An open-source, high-precision, multi-channel EEG acquisition system. *arXiv preprint*, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2203.02102v3>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [40] WU, D.; XU, Y.; LU, B.-L. *Transfer learning for EEG-based brain-computer interfaces: A review of progress since 2016*. arXiv preprint arXiv:2004.06286, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2004.06286>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [41] OPENAI. *ChatGPT*. San Francisco, 2025. Disponível em: <https://chat.openai.com>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [42] OPENAI. *ChatGPT*. San Francisco, 2025. Disponível em: <https://chat.openai.com>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [43] LACHENMAYER, E. et al. Avanços na eletrocorticografia e eletroencefalografia estereotáxica para mapeamento cortical. *Revista Brasileira de Neurologia*, v. 58, n. 3, p. 201-215, 2022. Disponível em: https://www.neuro.org.br/pdfs/RBN-58/RBN-583-SETEMBRO/RBN-583-SETEMBRO.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [44] RASSI NETO, A. et al. Tratamento cirúrgico das epilepsias. *Revista Neurociências*, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 118-126, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339613783_Tratamento_Cirurgico_das_Epilepsias. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [45] SANTOS, J. A.; AZAMBUJA, M. C. Manutenção preventiva em ambientes hospitalares: aplicabilidade de métodos da engenharia de produção. *Revista Produção Online*, Florianópolis, v. 23, n. 3, p. 742-765, 2023. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/4522>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [46] ZHU, B.; SHIN, U.; SHOARAN, M. *Closed-loop neural prostheses with on-chip intelligence: a review and a low-latency machine learning model for brain state detection*. Preprint arXiv:2109.05848 [q-bio.NC], 13 set. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2109.05848>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [47] SAVENHAGO, R. L.; ÁVILA, P. M.; ORTOLAN, R. L. Arquiteturas de redes neurais e suas aplicabilidades para classificação de sinais EEG para BCI. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, Passo Fundo, v. 14, n. 1, p. 55-69, 2022. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/rbca/article/view/13070>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [48] AVOLA, D.; CASCIO, M.; CINQUE, L.; FAGIOLI, A.; FORESTI, G. L.; MARINI, M. R.; PANNONE, D. *Analyzing EEG Data with Machine and Deep Learning: A Benchmark*. arXiv, 18 mar. 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2203.10009>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- [49] HOSSEINI, M. P. et al. Generative adversarial networks in EEG analysis: an overview. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, v. 20, n. 1, 2023. Disponível em: <https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-023-01169-w>. Acesso em: 29 jun. 2025.

DADOS BIOGRÁFICOS

Eduarda Hoerlle Ribeiro, nascida em 29/04/2002 em Pejuçara-RS, é técnica em automação industrial (2021) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha.

Ela foi, de 2021 a 2022, auxiliar de escritório em geral na empresa Automação Agroindustrial RDT Ltda. De janeiro de 2023 a maio de 2024, foi vendedora de comércio varejista na empresa NBRtec Indústria de Equipamentos Elétricos Ltda. Atualmente, ocupa a posição de assistente administrativo comercial na mesma empresa. Suas áreas de interesse são: eletrostática, eletrônica e tecnologias voltadas ao âmbito da saúde.