

CAPÍTULO 9

AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE INTERFACE CÉREBRO-COMPUTADOR PARA PRÓTESE NEURAL



<https://doi.org/10.22533/at.ed.798112521039>

Data de aceite: 03/07/2025

Vanessa Mazzardo

Graduanda em medicina
Universidade Paranaense
Umuarama- PR, Brasil

Isadora Fontelles Rios

Graduanda em medicina
Universidade de Araraquara
Araraquara - SP, Brasil

Diego de Matos Rodrigues da Silva

Graduado em medicina
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS, Brasil

Elisangela de Oliveira Pereira

Graduanda em medicina
Universidade Estácio de Sá
Angra dos Reis - RJ, Brasil

Milena Mainardi Miron

Graduanda em medicina
Universidade FEEVALE
Novo Hamburgo - RS, Brasil

Ana Júlia Borges Engel

Graduanda em Medicina
Instituto Master de Ensino Presidente
Antônio Carlos
Araguari - MG, Brasil

Andrezza Moreira Santos

Graduanda em Medicina
Instituto Master de Ensino Presidente
Antônio Carlos
Araguari- MG, Brasil

RESUMO: A integração de Interfaces Cérebro-Computador (ICCs) com próteses neurais representa um avanço transformador na reabilitação de indivíduos com deficiências motoras graves. Essas tecnologias permitem a captura e decodificação de sinais cerebrais para o controle de dispositivos externos, oferecendo novas possibilidades de recuperação de funções motoras perdidas. Este artigo de revisão examina criticamente os avanços recentes no campo das ICCs aplicadas às próteses neurais, com foco nas técnicas de aquisição de sinais neurais, algoritmos de processamento e decodificação, e a integração com sistemas de feedback sensorial. Abordam-se os desafios técnicos, como a biocompatibilidade de eletrodos invasivos, a adaptação de sistemas às variações fisiológicas dos sinais e a necessidade de controle em tempo real com múltiplos graus de liberdade. Além disso, são discutidas as considerações éticas associadas ao uso dessas tecnologias, incluindo a privacidade dos dados neurais, a autonomia dos usuários e as desigualdades no acesso. A análise conclui que, embora os avanços sejam significativos, a superação desses desafios técnicos e éticos é fundamental

para o desenvolvimento de próteses neurais que não apenas restaurem a mobilidade, mas também promovam a autonomia, a dignidade e o bem-estar dos usuários. Assim, o progresso contínuo dependerá de esforços interdisciplinares, integrando neurociência, engenharia biomédica e inteligência artificial para criar soluções mais eficazes e acessíveis, alinhadas com uma abordagem ética e socialmente responsável.

PALAVRAS-CHAVE: Interface Cérebro-Computador; próteses neurais; decodificação neural; feedback sensorial; aprendizado de máquina; biocompatibilidade; ética em neurotecnologia.

INTRODUÇÃO

A tecnologia de Interface Cérebro-Computador (ICC) surge como uma das mais promissoras na interseção entre neurociência e engenharia biomédica, ao estabelecer uma conexão direta entre o cérebro humano e dispositivos eletrônicos. As ICCs captam, processam e interpretam sinais neurais, permitindo que indivíduos com severas limitações motoras, como aqueles afetados por amputações, lesões medulares ou doenças neurodegenerativas, recuperem certo controle motor, ainda que suas vias nervosas periféricas estejam comprometidas (Dong *et al.*, 2023). Aplicações particularmente notáveis incluem as próteses neurais, que possibilitam a manipulação direta de dispositivos protéticos por meio dos pensamentos do usuário, eliminando a necessidade de interfaces que dependem de sinais musculares, como a eletromiografia (EMG). Essas próteses interpretam as intenções motoras ao decodificar os sinais emitidos pelo cérebro e convertê-los em movimentos precisos, restaurando funções motoras essenciais e promovendo maior autonomia e qualidade de vida para os usuários (Ornaghi; Monticeli; Agnol, 2023).

Os avanços recentes na ICC aplicada às próteses neurais resultam da integração de diversas áreas, incluindo neurociência, ciência da computação, engenharia biomédica e inteligência artificial. Esses progressos são impulsionados por melhorias na tecnologia de aquisição de sinais neurais, como microeletrodos implantáveis e métodos não invasivos de monitoramento cerebral, além de refinamentos em algoritmos de processamento de sinais e aprendizado de máquina. No entanto, o campo ainda enfrenta desafios técnicos e éticos significativos (Manero *et al.*, 2024). Do ponto de vista técnico, a precisão na captação de sinais neurais para garantir controle motor responsivo em tempo real é um dos principais desafios. Isso inclui minimizar ruídos nos sinais, aprimorar a resolução espacial e temporal dos dados adquiridos e integrar feedback sensorial para uma experiência de uso mais natural. A adaptação das ICCs às necessidades específicas e à variabilidade dos sinais neurais entre usuários ao longo do tempo também é fundamental (Yu *et al.*, 2023).

No plano ético, a utilização de ICCs em próteses neurais levanta questões complexas sobre a privacidade e o controle dos dados neurais. A possibilidade de captar sinais cerebrais diretamente suscita preocupações quanto ao uso não consensual dessas informações, que poderiam ser exploradas para vigilância ou manipulação das ações do usuário. Há considerações sobre a acessibilidade e a equidade, uma vez que o custo

elevado dessas tecnologias as torna potencialmente inacessíveis para uma parcela significativa da população. A regulamentação e as diretrizes éticas, ainda em fase inicial, precisam acompanhar o avanço dessa tecnologia para garantir sua implementação de maneira justa e segura (Conrad; Heggie, 2024).

Nesse contexto, este estudo explora os principais avanços na tecnologia de ICC aplicada à prótese neural, com uma análise das metodologias mais recentes e dos desafios em aberto. Serão discutidas as abordagens de aquisição de sinais neurais e o desenvolvimento de algoritmos de processamento e decodificação, focando no uso de aprendizado de máquina e redes neurais, assim como a integração desses avanços com próteses robóticas. Este trabalho enfatiza a evolução contínua do campo na busca por soluções eficazes e personalizadas para pessoas com deficiências motoras, bem como as implicações sociais decorrentes do desenvolvimento dessas tecnologias.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste artigo segue uma abordagem de revisão narrativa, visando sintetizar os avanços recentes no campo das Interfaces Cérebro-Computador (ICC) aplicadas a próteses neurais. A escolha por esse tipo de revisão justifica-se pela necessidade de apresentar um panorama abrangente dos principais desenvolvimentos teóricos e técnicos dessa área interdisciplinar, sem a restrição de um único protocolo sistemático, mas com uma flexibilidade que permita a inclusão de diferentes perspectivas e contribuições significativas.

Para tanto, realizou-se uma pesquisa extensiva em bases de dados acadêmicas, incluindo PubMed, IEEE Xplore, Scopus e Google Scholar. A seleção de artigos abrangeu tanto pesquisas experimentais quanto revisões anteriores, focalizando temas como aquisição de sinais neurais, algoritmos de processamento e decodificação de sinais, desenvolvimento de próteses neurais e os desafios éticos e técnicos associados às ICCs. A análise dos artigos selecionados incluiu uma leitura crítica com o objetivo de identificar as principais tendências de pesquisa, avanços técnicos significativos e desafios na implementação de ICCs para próteses neurais. Dessa forma, os estudos foram organizados conforme suas contribuições para os temas centrais da revisão, como métodos de aquisição de sinais neurais, processamento e decodificação desses sinais, e integração desses sistemas em dispositivos protéticos. As soluções propostas para os desafios identificados, especialmente o uso de algoritmos de aprendizado de máquina e inteligência artificial, também foram avaliadas.

Além da análise técnica, foram contempladas as discussões éticas presentes na literatura, abordando temas como impacto social e privacidade dos dados neurais. Para assegurar uma discussão abrangente dessas questões, incluíram-se estudos de neuroética e regulamentação, bem como pesquisas sobre acessibilidade e equidade no uso de

tecnologias de ICC. A análise dos aspectos éticos buscou articular a dimensão técnica da pesquisa com suas implicações sociais, sugerindo diretrizes para o avanço seguro e responsável dessa tecnologia.

Assim, a metodologia adotada visa proporcionar uma compreensão integrada e aprofundada do estado atual da tecnologia de ICC para próteses neurais, evidenciando avanços técnicos, oportunidades emergentes e desafios futuros, tanto científicos quanto éticos. O objetivo desta revisão é não só sintetizar o conhecimento existente, mas também identificar lacunas na literatura e sugerir caminhos para futuras investigações em uma área em rápida evolução.

Aquisição de Sinais Neurais

A aquisição de sinais neurais é fundamental para o funcionamento dos sistemas de Interface Cérebro-Computador (ICC), especialmente na aplicação em próteses neurais. A qualidade e precisão desses sinais são cruciais para que as intenções motoras do usuário sejam corretamente interpretadas e traduzidas em comandos para a prótese. A captura de sinais cerebrais pode ser realizada por meio de diferentes abordagens, classificadas em invasivas, semi-invasivas e não invasivas, cada uma com suas vantagens e limitações específicas em relação à invasividade, resolução espacial e temporal, e capacidade de interpretação das intenções motoras (Zhang *et al.*, 2024).

As técnicas invasivas, empregadas em pesquisas experimentais e algumas aplicações clínicas, envolvem a implantação de eletrodos diretamente no tecido cerebral. Esses eletrodos intracorticais, como os da matriz Utah Array, permitem a captação de potenciais de ação de neurônios individuais ou pequenos grupos neuronais, com alta resolução espacial. Essa tecnologia viabiliza uma decodificação precisa das intenções motoras, mas apresenta riscos, como danos ao tecido cerebral e inflamação crônica, além de possíveis problemas de durabilidade devido à resposta imunológica. Para mitigar essas questões, estão sendo desenvolvidos materiais biocompatíveis e eletrodos flexíveis, que reduzem a resposta inflamatória e melhoram a durabilidade dos implantes (Klaes, 2023; Sun *et al.*, 2024).

As técnicas semi-invasivas, como a eletrocorticografia (ECoG), envolvem a colocação de eletrodos sobre o córtex cerebral, o que exige uma intervenção cirúrgica, embora menos invasiva que a intracortical. A ECoG oferece resolução espacial intermediária e é menos afetada pelos problemas de biocompatibilidade, mas sua aplicabilidade clínica é limitada devido à necessidade de cirurgia. No entanto, a ECoG tem sido promissora no controle de próteses neurais em ensaios clínicos, por equilibrar a precisão dos sinais captados e a minimização dos riscos cirúrgicos (Wang *et al.*, 2023).

As técnicas não invasivas, como a eletroencefalografia (EEG), são amplamente utilizadas em ambientes clínicos e não clínicos, devido à sua segurança e facilidade de

uso. A EEG capta sinais elétricos na superfície do couro cabeludo, permitindo monitorar a atividade neural sem intervenções cirúrgicas, o que é vantajoso para estudos longitudinais e aplicações domésticas. Contudo, a baixa resolução espacial da EEG, causada pela dispersão dos sinais ao atravessar diversas camadas de tecido, é uma limitação significativa. A resolução temporal da EEG é suficiente para detectar eventos rápidos, mas insuficiente para discriminar atividades de áreas corticais específicas. Com o intuito de superar essas limitações, sistemas híbridos que integram EEG com outras técnicas, como a espectroscopia funcional por infravermelho próximo (fNIRS), têm sido desenvolvidos, combinando a capacidade de monitorar variações de fluxo sanguíneo cerebral com a captura de sinais elétricos para uma visão mais abrangente e detalhada da atividade neural (Lin *et al.*, 2023; Gentile; Barragan, 2023).

Apesar das limitações inerentes a cada abordagem, os avanços no processamento de sinais e na integração multimodal têm promovido melhorias na acurácia da aquisição de sinais neurais. A combinação de diferentes modalidades, como a EEG com ECoG ou fNIRS, proporciona uma análise mais completa da atividade cerebral e compensa as deficiências individuais de cada técnica. Ademais, a aplicação de algoritmos avançados de aprendizado de máquina para filtragem de ruído e interpretação de dados em tempo real amplia as possibilidades de uso das técnicas não invasivas no controle de próteses neurais, tornando-as mais precisas e eficientes (Khorev *et al.*, 2024).

Processamento e Decodificação dos Sinais Neurais

O processamento e a decodificação de sinais neurais são etapas críticas no funcionamento de Interfaces Cérebro-Computador (ICCs), especialmente para o controle de próteses neurais. Após a aquisição dos sinais, técnicas específicas são aplicadas para extrair informações relevantes dos dados brutos, remover ruídos e traduzi-los em comandos operáveis por dispositivos externos. A precisão e a eficiência dessas etapas são essenciais para garantir a interpretação correta das intenções motoras do usuário, transformando-as em movimentos controlados e naturais da prótese. Avanços em algoritmos de processamento e técnicas de decodificação, impulsionados pelo aprendizado de máquina e inteligência artificial, têm melhorado a robustez e precisão dos sistemas ICCs (Chen *et al.*, 2024).

Os sinais neurais captados, por métodos invasivos e não invasivos, apresentam ruído considerável decorrente de interferência externa, atividades cerebrais não relacionadas ao movimento e artefatos fisiológicos. O processamento envolve pré-processamento de sinais, incluindo filtragem de ruídos, amplificação de sinais fracos e normalização dos dados. Técnicas tradicionais, como filtros passa-baixa, passa-alta e passa-banda, removem ruídos em frequências específicas não associadas às atividades desejadas (Prasanna *et al.*, 2024). Além disso, a Análise de Componentes Independentes (ICA) permite separar fontes de sinais neurais e remover artefatos indesejados, o que melhora a qualidade do sinal e a acurácia da decodificação (Geethanjali, 2024).

A decodificação interpreta os sinais processados, traduzindo-os em comandos motores compreensíveis pela prótese. Métodos tradicionais, como o filtro de Wiener e o filtro de Kalman, utilizam modelos lineares para estabelecer uma relação direta entre os sinais captados e os movimentos pretendidos. Contudo, tais métodos são limitados na interpretação da complexidade dos sinais neurais, que geralmente apresentam relações não lineares e variáveis entre diferentes áreas corticais e intenções motoras (Blanco-Diaz *et al.*, 2024). Com o avanço da inteligência artificial, especialmente no aprendizado profundo, redes neurais convolucionais (CNNs) e recorrentes (RNNs) foram aplicadas para identificar padrões complexos nos dados neurais, oferecendo uma precisão que os métodos tradicionais não conseguem alcançar. Essas redes são treinadas em grandes conjuntos de dados para correlacionar sinais neurais a ações motoras, permitindo que o sistema aprenda a interpretar entradas neurais de forma adaptativa e autônoma (Zbinden; Molin; Ortiz-Catalan, 2024).

As técnicas de aprendizado por reforço também têm mostrado potencial na adaptação contínua das próteses neurais com base no feedback do usuário, permitindo que o modelo de decodificação seja refinado para atender às necessidades específicas e dinâmicas de cada indivíduo (Beech *et al.*, 2024). Outro fator importante é a latência do sistema, pois a decodificação dos sinais neurais deve ocorrer em tempo real para que o usuário realize movimentos fluidos e naturais. Implementações de algoritmos eficientes e otimizações no processamento de dados têm reduzido significativamente essa latência, possibilitando o controle em tempo real de próteses robóticas com alta precisão. A latência é determinante para o sucesso de um sistema de ICC em tarefas que envolvem movimentos rápidos ou precisos, como pegar objetos pequenos ou ajustar a força de preensão de uma prótese (Just *et al.*, 2024).

Adicionalmente, o feedback sensorial está sendo incorporado para fornecer uma sensação mais natural de controle sobre a prótese. Nos sistemas convencionais, o controle é unidirecional, onde sinais neurais são traduzidos em movimento, sem retorno sensorial para o usuário. Com o feedback tátil ou visual, geralmente fornecido por meio de estimulação elétrica, é possível aumentar a precisão dos movimentos e a sensação de controle do usuário. Quando integrado a sistemas de decodificação avançada, o feedback sensorial cria um ciclo de controle fechado, permitindo que o usuário ajuste os comandos com base nas informações recebidas da prótese e do ambiente (Kalbasi *et al.*, 2024).

Integração de Próteses Neurais

A integração de próteses neurais com sistemas de Interface Cérebro-Computador (ICC) representa um avanço notável na reabilitação neuromotora, permitindo que pessoas com deficiências motoras graves, como amputações ou lesões no sistema nervoso central, controlem dispositivos protéticos por meio de sinais cerebrais. Para que essa integração

seja eficaz, é essencial que os sinais neurais sejam captados, processados e decodificados de maneira a fornecer comandos precisos, possibilitando o controle fluido, natural e em tempo real das próteses. A implementação de um sistema de controle eficiente depende de diversos fatores, incluindo a precisão na decodificação das intenções motoras, a sincronização temporal entre os sinais e os movimentos da prótese, baixa latência e a incorporação de feedback sensorial, que amplia a sensação de controle e usabilidade (Mondini; Sburlea; Müller-Putz, 2024).

O objetivo principal dessa integração é restaurar a capacidade do usuário de realizar tarefas motoras complexas por meio de um dispositivo robótico que imite, com a maior precisão possível, os movimentos biológicos. Um dos maiores desafios técnicos é garantir que o sistema de ICC seja suficientemente responsivo para interpretar os sinais neurais e gerar comandos de controle em tempo real. A latência mínima entre a captação dos sinais e a execução dos movimentos é fundamental, pois atrasos, mesmo que pequenos, podem prejudicar a realização de tarefas de precisão, como segurar objetos ou ajustar a força de preensão de uma mão robótica. Recentes avanços na otimização de algoritmos de decodificação e na eficiência dos circuitos eletrônicos têm contribuído para reduzir essa latência, promovendo movimentos mais naturais e responsivos em próteses neurais (Alqahtani; Al-Naib; Althobaiti, 2024).

Outro aspecto fundamental é a robustez e adaptabilidade dos sistemas de controle. Idealmente, uma ICC deve ser capaz de se adaptar às variações nos sinais neurais e às mudanças nas condições fisiológicas do usuário, como fadiga e alterações na plasticidade cerebral. Sistemas adaptativos baseados em aprendizado de máquina, particularmente aqueles que utilizam algoritmos de aprendizado por reforço, mostram-se promissores na adaptação dinâmica dos modelos de controle, permitindo que a prótese se ajuste às necessidades do usuário em diferentes contextos. Essa adaptabilidade é especialmente importante em ambientes não controlados, onde a variabilidade dos sinais neurais e as demandas motoras podem variar de forma imprevisível (Sagastegui Alva *et al.*, 2024).

Além da adaptabilidade, o controle multidimensional também é essencial na integração de próteses neurais. Dispositivos protéticos modernos, como mãos e braços robóticos, realizam movimentos complexos e coordenados, requerendo um controle simultâneo de múltiplos graus de liberdade. Abordagens multicanal, como o uso de matrizes de microeletrodos em próteses controladas por sinais intracorticiais, permitem um controle preciso em tempo real desses dispositivos, possibilitando a execução de movimentos de alta complexidade (Graczyk *et al.*, 2024).

A incorporação de feedback sensorial é igualmente crucial para melhorar a sensação de controle e usabilidade das próteses. Em sistemas biológicos, o ciclo de controle motor inclui o feedback sensorial contínuo, essencial para a execução precisa dos movimentos. Em contrapartida, sistemas de ICC enfrentam desafios ao replicar esse ciclo, já que o usuário geralmente não recebe feedback direto sobre o estado da prótese ou o ambiente.

A falta de feedback sensorial pode dificultar o controle de tarefas motoras e aumentar o esforço cognitivo. Para mitigar esse problema, pesquisas investigam o uso de estímulos elétricos aplicados diretamente em nervos periféricos ou no córtex sensorial, fornecendo informações sobre o toque, a posição e a força aplicada pela prótese em tempo real. Outras soluções menos invasivas, como feedback tático ou vibrotátil na superfície da pele, também têm se mostrado eficazes para aprimorar a percepção do usuário em relação à interação da prótese com o ambiente (Lecompte; Achiche; Mohebbi, 2024).

Desafios e Considerações Éticas

A adoção de interfaces cérebro-computador (ICCs) para controle de próteses neurais, apesar de promissora, apresenta desafios técnicos e éticos complexos que devem ser abordados com rigor. À medida que essas interfaces evoluem, é fundamental considerar tanto as limitações tecnológicas quanto as implicações éticas e sociais de seu uso, assegurando que o desenvolvimento dessas tecnologias ocorra de maneira responsável e inclusiva. Nesse contexto, destacam-se os principais desafios técnicos associados às ICCs, bem como questões éticas relativas à captação e ao uso de sinais neurais.

Um dos maiores desafios técnicos das ICCs diz respeito à durabilidade e à biocompatibilidade de dispositivos invasivos. Embora técnicas invasivas, como os microeletrodos implantados, ofereçam maior precisão na captação de sinais devido à sua alta resolução espacial, a biocompatibilidade ainda é um entrave crítico. Implantes cerebrais enfrentam reações inflamatórias do sistema imunológico, frequentemente resultando na formação de tecido cicatricial ao redor dos eletrodos, o que degrada a qualidade dos sinais captados ao longo do tempo. Os materiais utilizados nesses dispositivos devem resistir ao ambiente corrosivo do corpo humano sem perder suas propriedades funcionais. A degradação dos eletrodos, com consequente perda de eficácia, compromete a viabilidade de longo prazo das ICCs invasivas, exigindo avanços contínuos na criação de materiais biocompatíveis e métodos de encapsulamento mais eficientes (Zeng; Huang, 2023).

Outro desafio significativo é o desenvolvimento de sistemas de ICC mais robustos e adaptáveis. Como os sinais neurais variam ao longo do tempo devido a mudanças fisiológicas e à plasticidade cerebral, esses sistemas devem ser capazes de se adaptar dinamicamente para manter uma decodificação precisa. A incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina e aprendizado por reforço tem se mostrado promissora para lidar com tais variações, permitindo que os sistemas se ajustem às mudanças nos sinais neurais do usuário. No entanto, esses algoritmos precisam ser continuamente refinados para que as ICCs sejam resilientes a ruídos, variações fisiológicas e interferências externas, especialmente em ambientes não controlados (Yue et al., 2024).

A integração de feedback sensorial também permanece um desafio. A ausência de um ciclo de feedback fechado, no qual o usuário receba informações sensoriais diretas

da prótese, limita a precisão e a naturalidade do controle motor. O desenvolvimento de sistemas de feedback, como a estimulação tátil ou eletroestática, que ofereçam ao usuário uma percepção mais natural da interação com o ambiente, ainda se encontra em fases iniciais e enfrenta dificuldades técnicas em termos de precisão e integração com o controle neural. Criar um feedback sensorial capaz de mimetizar a propriocepção e a sensação tátil dos membros biológicos é um avanço necessário para que as próteses neurais ofereçam uma experiência mais intuitiva e funcional (Ozsahin *et al.*, 2024).

Além dos desafios técnicos, as ICCs levantam questões éticas que devem ser cuidadosamente consideradas. Um dos dilemas centrais diz respeito à privacidade dos dados neurais, pois a captura de sinais diretamente do cérebro frequentemente inclui informações sensíveis. O uso e armazenamento desses dados suscitam preocupações sobre acesso não autorizado e utilização indevida (Nijboer *et al.*, 2011). A ausência de regulamentação específica em relação à coleta desses dados pode expor os usuários a riscos, como vigilância não consensual ou usos imprevistos. Assim, é fundamental estabelecer políticas que protejam a privacidade dos dados neurais e garantam o consentimento informado dos usuários (Conrad; Heggie, 2024).

Outro aspecto ético relevante é a autonomia e o controle sobre as ICCs. À medida que a tecnologia avança, surgem preocupações quanto à possibilidade de manipulação ou controle externo sem o consentimento do usuário. A capacidade de uma ICC interpretar sinais neurais de forma autônoma pode levantar questões sobre o controle humano e a autonomia da máquina. Esse aspecto é particularmente preocupante em contextos onde a prótese realiza ações sem supervisão contínua, gerando dilemas sobre responsabilidade legal em casos de falha ou comportamentos imprevistos. Assegurar que os usuários mantenham controle total sobre as ações da prótese é essencial, especialmente em ICCs voltadas para a reabilitação de movimentos finos e complexos (Huang *et al.*, 2024).

Por fim, o impacto psicológico do uso prolongado de ICCs levanta questões sobre alienação e despersonalização, uma vez que a interação direta entre sinais neurais e uma prótese robótica pode afetar o senso de identidade dos usuários. A integração de uma prótese neural ao corpo e ao senso de “self” é um processo complexo, que pode influenciar a autoestima e a adaptação psicológica do indivíduo à nova condição (Costa *et al.*, 2024).

CONCLUSÃO

Os avanços nas técnicas de aquisição, processamento e decodificação de sinais neurais, somados à crescente sofisticação dos dispositivos protéticos, têm possibilitado o desenvolvimento de sistemas capazes de oferecer controle motor preciso e responsável por meio de sinais cerebrais. Apesar de esses avanços ainda estarem em estágios iniciais de aplicação, o futuro promete próteses neurais integradas a sistemas de Interface Cérebro-Computador (ICC), capazes de restaurar tanto a mobilidade quanto a autonomia e a qualidade de vida de milhões de pessoas.

O sucesso no desenvolvimento desses sistemas exige uma abordagem interdisciplinar que envolva neurociência, engenharia biomédica, ciência da computação e inteligência artificial. Recentes avanços no aprendizado de máquina e redes neurais têm melhorado significativamente a decodificação de sinais neurais, permitindo uma interpretação mais precisa das intenções motoras dos usuários. Além disso, técnicas avançadas de processamento de sinais, aliadas a métodos invasivos e não invasivos, têm aumentado a resolução e a precisão na captação de dados neurais. No entanto, desafios técnicos persistem, como melhorar a biocompatibilidade dos dispositivos, otimizar a robustez dos sistemas e desenvolver métodos de feedback sensorial mais sofisticados, proporcionando uma experiência de controle mais natural.

As implicações éticas são igualmente desafiadoras. A coleta e uso de dados neurais pessoais requerem regulamentações rigorosas para proteger a privacidade e garantir o consentimento informado. O acesso equitativo a essas tecnologias também é uma preocupação, dado o alto custo e a complexidade dos sistemas ICC. Além disso, o impacto psicológico do uso prolongado de dispositivos controlados por ICCs sobre a percepção corporal e a identidade pessoal dos usuários deve ser cuidadosamente monitorado.

O avanço contínuo dessas tecnologias depende de superar os desafios técnicos e éticos e de garantir que seu desenvolvimento seja inclusivo e responsável. Somente assim será possível transformar a vida de pessoas com deficiência motora, oferecendo novas oportunidades de reabilitação e inclusão.

REFERÊNCIAS

- ALQAHTANI, Nouf Jubran; AL-NAIB, Ibraheem; ALTHOBAITI, Murad. Recent progress on smart lower prosthetic limbs: a comprehensive review on using EEG and fNIRS devices in rehabilitation. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 12, p. 1454262, 2024.
- BEECH, Peter et al. Deep Learning for Visual Neuroprostheses. **arXiv preprint arXiv:2401.03639**, 2024.
- BLANCO-DIAZ, Cristian Felipe et al. Decoding lower-limb kinematic parameters during pedaling tasks using deep learning approaches and EEG. **Medical & Biological Engineering & Computing**, p. 1-17, 2024.
- CHEN, Yanxiao et al. Considerations and discussions on the clear definition and definite scope of brain-computer interfaces. **Frontiers in Neuroscience**, v. 18, p. 1449208, 2024.
- CONRAD, Colin; HEGGIE, Carla. Legal and Ethical Challenges Raised by Advances in Brain-Computer Interface Technology. **Available at SSRN 4872064**, 2024.
- COSTA, Rayanna Thayse Florêncio et al. Rehabilitation with dental prostheses and its influence on brain activity: A systematic review. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, v. 131, n. 3, p. 403-409, 2024.
- DONG, Yuanrui et al. Neural decoding for intracortical brain–computer interfaces. **Cyborg and Bionic Systems**, v. 4, p. 0044, 2023.

GEETHANJALI, P. Signal Processing for Understanding Physiological Mechanisms for Information Decoding. In: **Biomedical Signal Processing**. CRC Press, 2024. p. 3-42.

GENTILE, Eleonora; BARRAGAN, Antonio Casas. EEG/fNIRS. In: **Psychophysiology Methods**. New York, NY: Springer US, 2023. p. 181-202.

GRACZYK, Emily et al. Clinical Applications and Future Translation of Somatosensory Neuroprostheses. **Journal of Neuroscience**, v. 44, n. 40, 2024.

HUANG, He et al. Integrating Upper-Limb Prostheses with the Human Body: Technology Advances, Readiness, and Roles in Human–Prosthesis Interaction. **Annual Review of Biomedical Engineering**, v. 26, 2024.

JUST, Fabian et al. Deployment of machine learning algorithms on resource-constrained hardware platforms for prosthetics. **IEEE Access**, 2024.

KALBASI, Mohammad et al. A Hardware-Efficient EMG Decoder with an Attractor-based Neural Network for Next-Generation Hand Prostheses. **arXiv preprint arXiv:2405.20052**, 2024.

KLAES, Christian. How Can I Use Utah Arrays for Brain-Computer Interfaces?. In: **Intracranial EEG: A Guide for Cognitive Neuroscientists**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 863-872.

LECOMPTE, Olivier; ACHICHE, Sofiane; MOHEBBI, Abolfazl. A Review of Proprioceptive Feedback Strategies for Upper-Limb Myoelectric Prostheses. **IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics**, 2024.

LIN, Sen et al. Advanced Electrode Technologies for Noninvasive Brain–Computer Interfaces. **ACS nano**, v. 17, n. 24, p. 24487-24513, 2023.

MANERO, Albert et al. Emerging Medical Technologies and Their Use in Bionic Repair and Human Augmentation. **Bioengineering**, v. 11, n. 7, p. 695, 2024.

MONDINI, Valeria; SBURLEA, Andreea-loana; MÜLLER-PUTZ, Gernot R. Towards unlocking motor control in spinal cord injured by applying an online EEG-based framework to decode motor intention, trajectory and error processing. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 4714, 2024.

ORNAGHI JR, Heitor Luiz; MONTICELI, Francisco Maciel; AGNOL, Lucas Dall. A Review on Polymers for Biomedical Applications on Hard and Soft Tissues and Prosthetic Limbs. **Polymers**, v. 15, n. 19, p. 4034, 2023.

OZSAHIN, Dilber Uzun et al. Design of interactive neural input device for arm prosthesis. In: **Practical Design and Applications of Medical Devices**. Academic Press, 2024. p. 1-21.

PRASANNA, Dasari Lakshmi et al. High attenuation electromagnetic interface filter for effective processing of audio signals. **Engineering Research Express**, v. 6, n. 3, p. 035309, 2024.

SAGASTEGUI ALVA, Patrick G. et al. Excitation of natural spinal reflex loops in the sensory-motor control of hand prostheses. **Science Robotics**, v. 9, n. 90, p. eadl0085, 2024.

SUN, Yike et al. Signal acquisition of brain-computer interfaces: a medical-engineering crossover perspective review. **Fundamental Research**, 2024.

ZHANG, Hongyu et al. Brain–computer interfaces: the innovative key to unlocking neurological conditions. **International Journal of Surgery**, v. 110, n. 9, p. 5745-5762, 2024.

ZBINDEN, Jan; MOLIN, Julia; ORTIZ-CATALAN, Max. Deep learning for enhanced prosthetic control: Real-time motor intent decoding for simultaneous control of artificial limbs. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, 2024.

WANG, Junjie et al. Flexible electrodes for brain–computer interface system. **Advanced Materials**, v. 35, n. 47, p. 2211012, 2023.

YU, Huiwen et al. Biomimetic flexible sensors and their applications in human health detection. **Biomimetics**, v. 8, n. 3, p. 293, 2023.

YUE, Ouyang et al. Biomimetic Exogenous “Tissue Batteries” as Artificial Power Sources for Implantable Bioelectronic Devices Manufacturing. **Advanced Science**, v. 11, n. 11, p. 2307369, 2024.