LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

INTERFACES CÉREBRO-COMPUTADOR E NEUROTECNOLOGIA

BRAIN-COMPUTER INTERFACES AND NEUROTECHNOLOGY

INTERFACES CEREBRO-COMPUTADORA Y NEUROTECNOLOGÍA

https://doi.org/10.56238/levv16n50-077

Data de submissão: 25/06/2025 **Data de publicação:** 25/07/2025

Hermenegildo Woropo Albino Paiva
Mestrando em Ciências da Computação
Instituição: Universidade Federal de Lavras
E-mail: hermenegildo.paiva@estudante.ufla.br

José Gelson Gonçalves
Mestrando em Ciências da Computação
Instituição: Universidade Federal de Lavras
E-mail: jose.goncalves1@estudante.ufla.br

RESUMO

Nas últimas décadas, o progresso na tecnologia resultou na criação de uma nova fronteira entre biologia e engenharia: as interfaces cérebro-computador (ICC), ou brain-computer interfaces (BCI). Esses sistemas possibilitam uma comunicação direta entre o cérebro humano e aparelhos externos, dispensando a intermediação muscular. A neurotecnologia, um campo que une neurociência, engenharia, ciência da computação e inteligência artificial, tem ampliado as capacidades das ICC com aplicações promissoras, principalmente na medicina. Entretanto, apesar dos progressos já realizados, existem desafios relevantes, como a imprecisão dos sinais coletados, a complexidade do processamento neural e as dificuldades de acessibilidade. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar um panorama atual das ICC e da neurotecnologia. Conclui-se que, ao facilitar a comunicação direta entre o cérebro humano e sistemas computacionais, essas inovações inauguram uma nova era de oportunidades terapêuticas, funcionais e cognitivas. Desde o seu desenvolvimento teórico até as atuais implementações clínicas e experimentais, as ICC têm se revelado ferramentas de imenso valor para a recuperação de pacientes, o suporte a indivíduos com deficiência e a busca por novas formas de interação com o universo digital. O progresso nas técnicas de captação de sinais cerebrais, o aprimoramento dos algoritmos de decodificação e a melhoria dos dispositivos físicos têm permitido uma conexão cada vez mais precisa entre mente e máquina, estabelecendo esse campo como um núcleo estratégico para a inovação científica e tecnológica.

Palavras-chave: Interfaces Cérebro-computador. Neurotecnologia. Neurociência. Inteligência Artificial.

ABSTRACT

In recent decades, technological advances have created a new frontier between biology and engineering: brain-computer interfaces (BCIs). These systems enable direct communication between the human brain and external devices, eliminating the need for muscle intervention. Neurotechnology, a field that combines neuroscience, engineering, computer science, and artificial intelligence, has

expanded the capabilities of BCIs with promising applications, particularly in medicine. However, despite the progress already made, significant challenges remain, such as the inaccuracy of collected signals, the complexity of neural processing, and accessibility difficulties. Therefore, this paper aims to present a current overview of BCIs and neurotechnology. It is concluded that, by facilitating direct communication between the human brain and computer systems, these innovations usher in a new era of therapeutic, functional, and cognitive opportunities. From their theoretical development to current clinical and experimental implementations, BCIs have proven to be immensely valuable tools for patient recovery, supporting individuals with disabilities, and the search for new ways to interact with the digital world. Advances in brain signal capture techniques, improved decoding algorithms, and improved physical devices have enabled an increasingly precise connection between mind and machine, establishing this field as a strategic hub for scientific and technological innovation.

Keywords: Brain-computer Interfaces. Neurotechnology. Neuroscience. Artificial Intelligence.

RESUMEN

En las últimas décadas, los avances tecnológicos han creado una nueva frontera entre la biología y la ingeniería: las interfaces cerebro-computadora (ICC). Estos sistemas permiten la comunicación directa entre el cerebro humano y dispositivos externos, eliminando la necesidad de intervención muscular. La neurotecnología, un campo que combina la neurociencia, la ingeniería, la informática y la inteligencia artificial, ha ampliado las capacidades de las ICC con aplicaciones prometedoras, especialmente en medicina. Sin embargo, a pesar de los avances ya alcanzados, persisten importantes desafíos, como la inexactitud de las señales recopiladas, la complejidad del procesamiento neuronal y las dificultades de accesibilidad. Por lo tanto, este artículo pretende presentar una visión general actual de las ICC y la neurotecnología. Se concluye que, al facilitar la comunicación directa entre el cerebro humano y los sistemas informáticos, estas innovaciones marcan el comienzo de una nueva era de oportunidades terapéuticas, funcionales y cognitivas. Desde su desarrollo teórico hasta las implementaciones clínicas y experimentales actuales, las ICC han demostrado ser herramientas sumamente valiosas para la recuperación de pacientes, el apoyo a personas con discapacidad y la búsqueda de nuevas formas de interactuar con el mundo digital. Los avances en las técnicas de captura de señales cerebrales, la mejora de los algoritmos de decodificación y la optimización de los dispositivos físicos han permitido una conexión cada vez más precisa entre la mente y la máquina, consolidando este campo como un centro estratégico para la innovación científica y tecnológica.

Palabras clave: Interfaces Cerebro-computadora. Neurotecnología. Neurociencia. Inteligencia Artificial.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o progresso na tecnologia resultou na criação de uma nova fronteira entre biologia e engenharia: as interfaces cérebro-computador (ICC), ou brain-computer interfaces (BCI). Esses sistemas possibilitam uma comunicação direta entre o cérebro humano e aparelhos externos, dispensando a intermediação muscular. Tais tecnologias se fundamentam na captura de sinais neurais, sua decodificação por meio de algoritmos e a conversão em comandos para operar próteses, computadores, cadeiras de rodas e outras ferramentas, trazendo uma revolução na interação entre humanos e máquinas.

A neurotecnologia, um campo que une neurociência, engenharia, ciência da computação e inteligência artificial, tem ampliado as capacidades das ICC com aplicações promissoras, principalmente na medicina. Indivíduos com paralisias motoras, condições neurodegenerativas ou amputações já estão se beneficiando de inovações que restauram parte de sua independência. Ademais, o emprego dessas tecnologias em contextos não clínicos, como entretenimento, educação e comunicação alternativa, indica um futuro no qual o pensamento pode controlar sistemas digitais de forma mais intuitiva e fluida.

A escolha deste tema é fundamentada pela crescente importância científica e social das interfaces cérebro-computador na sociedade atual, tanto pelo impacto positivo nas vidas de pessoas com deficiências quanto pelas oportunidades que apresentam para expandir a cognição humana e a interação com dispositivos. Compreender os fundamentos, usos e limitações dessas tecnologias é essencial para refletir sobre suas consequências éticas, técnicas e sociais.

Entretanto, apesar dos progressos já realizados, existem desafios relevantes, como a imprecisão dos sinais coletados, a complexidade do processamento neural e as dificuldades de acessibilidade. Nesse contexto, surge a seguinte questão: quais são os principais desenvolvimentos, obstáculos e aplicações atuais das interfaces cérebro-computador e da neurotecnologia no cenário atual?

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar um panorama atual das ICC e da neurotecnologia, enfatizando suas bases científicas, principais áreas de aplicação, desafios enfrentados e perspectivas futuras, com foco nos impactos sociais e éticos resultantes de sua adoção em larga escala.

A abordagem utilizada neste estudo é a pesquisa bibliográfica, baseada em publicações científicas, livros, revistas especializadas e artigos acadêmicos recentes, com a intenção de reunir e organizar o conhecimento existente sobre o assunto para fornecer uma análise crítica e embasada.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTOS DAS INTERFACES CÉREBRO-COMPUTADOR

Segundo Maiseli et al. (2023), as Interfaces Cérebro-Computador, frequentemente referidas pela sigla em inglês BCI, são sistemas que possibilitam uma conexão direta entre o cérebro humano e dispositivos externos, eliminando a necessidade de envolvimento dos músculos periféricos ou do sistema nervoso autônomo. Tais sistemas operam pela captação de sinais elétricos ou metabólicos que resultam da atividade cerebral, os quais são processados e convertidos em comandos digitais. O fundamento das ICC se origina de pesquisas em neurofisiologia que investigam os potenciais elétricos do cérebro e seu vínculo com estímulos, assim como com respostas motoras, sensoriais e cognitivas. Com o progresso em engenharia biomédica e inteligência artificial, essas tecnologias passaram a ser implementadas de forma mais precisa e eficaz, possibilitando que os usuários controlem computadores, próteses robóticas, cadeiras de rodas e até aplicativos e comunicação, utilizando apenas sua atividade mental.

O funcionamento das ICC é dividido em três etapas principais de acordo com Young et al. (2021): a coleta dos sinais neurais, a análise desses sinais com a identificação de características importantes e a conversão dessas informações em comandos que podem ser acionados. Para isso, o sistema precisa distinguir padrões de atividades cerebrais que se referem a intenções específicas, como mover um cursor na tela ou ativar uma função em uma prótese. A intricada natureza do cérebro humano, junto com a variabilidade dos sinais entre diferentes pessoas, traz desafios significativos para a criação de sistemas aplicáveis em larga escala, exigindo algoritmos que sejam robustos e adaptáveis. Além disso, é necessário um treinamento individual, onde o usuário deve aprender a controlar seus sinais cerebrais para melhorar a eficácia na utilização do sistema. Portanto, o sucesso das ICC depende tanto da tecnologia utilizada quanto da habilidade do usuário em se adaptar.

A implementação bem-sucedida de uma interface cérebro-computador requer, assim, um entendimento abrangente de neurociência, engenharia elétrica, ciência da computação e psicologia cognitiva. As ICC não apenas funcionam a partir de sinais biológicos, mas também envolvem aspectos do comportamento humano, motivação e interação em tempo real com as máquinas. Essa conexão direta entre mente e máquina estabelece um novo paradigma nas tecnologias assistivas e interativas, desafiando os métodos tradicionais de comunicação e controle. Simultaneamente, levanta questões significativas sobre os limites da tecnologia, a concepção de consciência e o papel da cognição na era da digitalização neurofisiológica (MAISELI et al. 2023).

Entre os diversos tipos de ICC, eles podem ser divididos em três grandes grupos conforme apontam Karsanach et al. (2016): invasivos, não invasivos e semi-invasivos. As ICC invasivas consistem na inserção de eletrodos diretamente no tecido do cérebro, possibilitando a captura de sinais neurais com precisão espacial e temporal elevada. Essa tecnologia é utilizada, por exemplo, em

indivíduos que sofrem de sérias lesões neuromotoras, como aqueles afetados pela síndrome do encarceramento, pois a interação direta com os neurônios resulta em respostas mais rápidas e precisas. No entanto, essa metodologia exige uma cirurgia e apresenta riscos substanciais à saúde do paciente, além de custos altos e questões éticas complicadas.

As interfaces de controle cerebral não invasivas são, atualmente, as mais pesquisadas e utilizadas, principalmente por serem seguras, acessíveis e aplicáveis em diversos contextos, tanto clínicos quanto não clínicos. Esses sistemas capturam sinais do cérebro através de sensores colocados no couro cabeludo, frequentemente usando a técnica de eletroencefalografia (EEG). Embora a resolução espacial seja limitada devido à atenuação dos sinais pelas estruturas do crânio, as ICC não invasivas mostram um enorme potencial para aplicações práticas, como reabilitação motora, comunicação alternativa e interação entre humanos e máquinas. Além disso, são frequentemente utilizadas em investigações acadêmicas e clínicas para examinar a neuroplasticidade e o comportamento cognitivo (YOUNG et al. 2021).

No meio-termo, Sousa et al. (2022) citam que, as ICC semi-invasivas aparecem como uma opção intermediária, onde os eletrodos são colocados na superfície cortical ou logo abaixo da dura-máter, sem penetrar profundamente no tecido cerebral. Um exemplo comum desse tipo de tecnologia é a eletrocorticografia (ECoG), que proporciona uma resolução superior em comparação aos métodos não invasivos, ao mesmo tempo em que apresenta menos riscos do que os procedimentos intracorticais. Apesar de ainda ser considerada experimental em muitos países, a ECoG tem mostrado resultados promissores para pacientes que precisam de soluções de alto desempenho sem a agressividade dos implantes profundos. Assim, a escolha entre os diferentes tipos de ICC é influenciada por fatores como o objetivo da aplicação, a condição clínica do usuário, a viabilidade técnica e as considerações éticas e legais.

Para o funcionamento adequado dessas interfaces, ainda de acordo com Sousa et al. (2022), é essencial que os sinais neurais sejam captados de maneira confiável e estável. Um dos métodos mais comuns para a obtenção de sinais cerebrais é o EEG (eletroencefalografia), uma técnica não invasiva que mede potenciais elétricos gerados pela atividade neural na superfície do couro cabeludo. O EEG é popular por ser portátil, econômico e por oferecer boa resolução temporal, embora sua limitação em resolução espacial dificulte a detecção de atividades em áreas cerebrais mais profundas. Outra técnica significativa é a ressonância magnética funcional (fMRI), que possibilita o mapeamento de áreas do cérebro ativadas com alta resolução espacial, monitorando variações no fluxo sanguíneo associadas à atividade neural. No entanto, a fMRI é utilizada com menos frequência em ICC operacionais devido a seu custo elevado, tamanho dos equipamentos e menor resolução temporal.

A ECoG é uma técnica que envolve a colocação de eletrodos diretamente na superfície cerebral, funcionando como um intermediário entre os métodos que são invasivos e os não invasivos. Essa

abordagem capta sinais com maior precisão e exatidão, sendo valiosa em situações clínicas desafiadoras e investigações que requerem alta acuidade. Além disso, outros métodos, como a espectroscopia funcional no infravermelho próximo (fNIRS), estão sendo investigados; esse método analisa as mudanças na oxigenação do sangue no cérebro, oferecendo uma opção não invasiva para a supervisão das funções cognitivas. A variedade de técnicas disponíveis reflete o contínuo empenho em encontrar soluções que harmonizem qualidade do sinal, segurança e facilidade de uso (SUN E YE, 2023).

De acordo com Maiseli et al. (2023), a decisão sobre qual método de captação utilizar está profundamente relacionada à finalidade pretendida e à infraestrutura que se tem à disposição, dado que cada abordagem possui suas próprias vantagens e limitações. Por exemplo, em ambientes clínicos controlados, abordagens mais invasivas e precisas podem ser apropriadas, enquanto em situações em casa ou na escola, tecnologias mais simples e confortáveis são preferidas. O avanço dessas técnicas é crucial para assegurar que as ICC sejam eficientes, responsivas e seguras, independentemente do público ou do contexto em que estejam inseridas.

Depois que os sinais neurais são captados, Sun e Ye (2023) pontuam que, eles precisam ser analisados por sistemas computacionais que são capazes de convertê-los em comandos que façam sentido. Essa fase inclui o pré-processamento dos sinais, que envolve a eliminação de ruídos e a filtragem, a extração de características significativas, como frequência e amplitude, e, finalmente, a categorização dessas informações através de algoritmos, geralmente fundamentados em inteligência artificial e aprendizado de máquina. Esses algoritmos são treinados com dados de referência para identificar padrões cerebrais relacionados a intenções ou estímulos específicos, como imaginar o movimento de uma mão ou focar em um ponto na tela.

A eficácia desses algoritmos depende da qualidade dos dados, da adaptação ao usuário e da resistência a variações fisiológicas e ambientais. Assim, Sousa et al. (2022) citam que, muitos sistemas modernos empregam modelos personalizados de aprendizado contínuo, que ajustam-se progressivamente às peculiaridades do usuário em função de uma interação prolongada. A combinação entre neurociência computacional e aprendizado de máquina é, portanto, um dos fundamentos principais para o progresso das ICC, pois permite a tradução confiável da atividade mental humana em linguagem que a máquina pode entender, inaugurando uma nova era na comunicação entre cérebro e tecnologia.

2.2 NEUROTECNOLOGIA: INTEGRAÇÃO ENTRE CÉREBRO E MÁQUINA

Para Russel et al. (2024), neurotecnologia refere-se às inovações tecnológicas que se conectam ao sistema nervoso humano com a finalidade de observar, alterar ou aprimorar suas funções. Este setor em crescimento baseia-se na neurociência e na engenharia, sendo responsável pela criação de

dispositivos e sistemas que possibilitam a leitura, gravação, estimulação ou modificação controlada da atividade neural. As utilizações da neurotecnologia são amplas, incluindo desde áreas clínicas – como a terapia de distúrbios neurológicos, implantes para audição e próteses neurológicas – até aplicações fora do escopo médico, como o aumento das capacidades cognitivas, a realidade aumentada e o controle de equipamentos através do pensamento. Ao dissolver as fronteiras entre o biológico e o tecnológico, a neurotecnologia abre uma nova era de interação entre o cérebro humano e sistemas artificiais.

O alcance da neurotecnologia vai além da interface simples entre ser humano e máquina para Coelho (2015), pois também envolve a captação, análise e modificação de dados cerebrais para objetivos terapêuticos, funcionais e, em algumas situações, comerciais. Isso abrange tecnologias como estimulação cerebral profunda, neurofeedback, neuromodulação e interfaces entre cérebro e computador, que se encaixam como um subcampo dentro do amplo domínio da neurotecnologia. A habilidade de impactar o sistema nervoso central e periférico traz consequências significativas para a compreensão da mente, o comportamento humano e a autonomia individual, exigindo reflexão sobre não apenas o que é tecnicamente viável, mas também o que é eticamente desejável.

Dessa maneira, a neurotecnologia deve ser vista como um setor estratégico para o futuro nas áreas de saúde, educação, comunicação e na própria definição de humanidade. De acordo com Nolêto et al. (2020), ao disponibilizar soluções para indivíduos com limitações neurológicas, ela ajuda a promover inclusão e a elevar a qualidade de vida. Por outro lado, ao possibilitar a ampliação das capacidades cognitivas em indivíduos saudáveis, a neurotecnologia desafia noções tradicionais de normalidade, competência e mérito, suscitando discussões bioéticas acerca de acesso, desigualdade e a manipulação do comportamento. O progresso neste campo requer, assim, uma perspectiva crítica e abrangente que leve em conta as consequências sociais, culturais e legais das novas tecnologias neurais.

Além disso, o crescimento da neurotecnologia é alimentado por uma variedade de interesses – acadêmicos, clínicos, militares e corporativos – o que aumenta ainda mais sua abrangência e complexidade. Empresas de tecnologia de grande porte, como Neuralink, Meta e Kernel, têm investido bilhões de dólares na criação de dispositivos neurais capazes de realizar leitura e escrita cerebral em tempo real. Simultaneamente, instituições de ensino e centros de pesquisa ao redor do globo estão desenvolvendo tecnologias com um foco em reabilitação e inclusão. Essa paisagem diversificada evidencia que a neurotecnologia é, primeiramente, um domínio em crescimento que reflete e influencia a direção da sociedade contemporânea diante das novas e inexploradas possibilidades de conexão entre cérebro e máquina (COELHO, 2015).

Segundo Russel et al. (2024), a interdisciplinaridade representa uma característica essencial da neurotecnologia, pois sua implementação requer a cooperação entre várias áreas do saber. A

neurociência oferece os princípios sobre como o cérebro funciona, suas conexões, os processos de plasticidade sináptica e os padrões de ativação das redes neuronais. Com esse entendimento, profissionais de engenharia e ciência da computação criam sistemas que podem captar, interpretar e reagir a estímulos do cérebro. Essa colaboração é crucial para desenvolver dispositivos que sejam funcionais, seguros e tenham a capacidade de operar em tempo real, com a precisão necessária para atender às necessidades clínicas e operacionais.

A inteligência artificial exerce um papel cada vez mais crucial na análise de dados neurais. Para Mussatto e Silva (2024), utilizando algoritmos de machine learning e redes neurais profundas, é factível descobrir padrões complexos nos sinais cerebrais que não seriam detectados por métodos estatísticos convencionais. Esses sistemas não apenas organizam os sinais, mas também aprendem e se ajustam ao longo do tempo, melhorando consideravelmente a eficácia das interfaces cérebro-computador e de outras tecnologias neurotecnológicas. A IA possibilita, por exemplo, que uma prótese robótica "compreenda" a intenção motora do usuário através de sinais cerebrais sutis, resultando em movimentos mais fluidos e precisos.

A engenharia biomédica atua como um intermediário entre a teoria e a implementação prática, sendo responsável pelo desenvolvimento de dispositivos físicos – como sensores, eletrodos, chips e interfaces – que se conectam ao corpo humano. Este campo deve equilibrar aspectos como desempenho técnico, biocompatibilidade, durabilidade e conforto, sem deixar de seguir as rigorosas normas regulatórias aplicáveis a quaisquer dispositivos médicos. A miniaturização dos componentes e a inovação de materiais flexíveis e menos invasivos têm sido avanços cruciais, tornando os dispositivos mais seguros e duradouros, tanto em ambientes hospitalares quanto em lares (SANTOS et al. 2022).

Outras disciplinas têm papéis igualmente significativos segundo Kawala-Sterniuk et al. (2021). A psicologia, por exemplo, auxilia na análise de como as tecnologias neurais afetam o comportamento, a percepção e as experiências subjetivas dos usuários. O direito e a bioética enriquecem a discussão sobre responsabilidade, privacidade relacionada aos dados neurais e os limites da intervenção cerebral. A intersecção de conhecimentos variados é o que torna a neurotecnologia um campo fascinante e desafiador, pois cada nova descoberta técnica traz consigo várias implicações sociais e éticas que requerem uma análise cuidadosa e aprofundada.

A cooperação entre essas áreas não é apenas desejada, mas essencial. Ainda de acordo com Kawala-Sterniuk et al. (2021), sem a colaboração entre neurociência, engenharia, ciência da computação, psicologia e ética, não seria viável criar sistemas verdadeiramente eficazes, seguros e centrados no ser humano. Portanto, a neurotecnologia demanda um modelo de inovação que integre o desenvolvimento técnico com a reflexão crítica, a regulação ética e a inclusão social, assegurando que os benefícios dessas tecnologias sejam distribuídos amplamente e evitando novas formas de exclusão ou dependência.

Os progressos em tecnologia de hardware e software para neurotecnologia têm sido fundamentais para aprimorar as interfaces cérebro-computador em termos de precisão, estabilidade e acessibilidade. No que diz respeito ao hardware, nota-se uma rápida melhoria na qualidade dos sensores neurais, destacando-se a criação de eletrodos que são mais sensíveis, compactos e com maior resolução tanto espacial quanto temporal. Tais inovações permitem uma captação mais fiel dos sinais cerebrais, mesmo fora do ambiente de laboratório. Ademais, estudos estão sendo realizados para tornar os dispositivos menos invasivos, utilizando tecnologias como tatuagens eletrônicas, implantes epidérmicos e sensores sem fio (SANTOS et al. 2022).

A conectividade sem fio é um aspecto crucial no progresso do hardware para Maiseli et al. (2023), pois proporciona um uso mais livre e integrado das tecnologias no dia a dia dos usuários. As interfaces cérebro-computador contemporâneas, por exemplo, já operam em tempo real com dispositivos móveis ou vestíveis, possibilitando que pessoas com deficiência se comuniquem em ambientes sociais ou profissionais. A diminuição do tamanho e do consumo energético dos componentes eletrônicos também favorece uma maior autonomia, permitindo aplicações em casa e de longa duração. Isso representa um avanço significativo em direção à democratização do acesso às neurotecnologias.

Na área do software, Russel et al. (2024) citam que, o desenvolvimento de algoritmos de aprendizado de máquina e inteligência artificial tem possibilitado uma análise cada vez mais exata dos sinais neurais, mesmo considerando a complexidade e a variabilidade individual desses dados. Modelos de aprendizado profundo, como redes neurais convolucionais e recorrentes, conseguem identificar padrões sutis na ativação cerebral que refletem intenções motoras, estados emocionais ou processos cognitivos específicos. Esses avanços ampliam as possibilidades de aplicação das interfaces cérebro-computador, permitindo, por exemplo, o controle de dispositivos por meio de pensamentos específicos ou a detecção de alterações neurológicas precoces com fins diagnósticos.

Além da inteligência artificial, outra inovação significativa em software é a utilização de ambientes de realidade virtual e aumentada que se integram com as interfaces cérebro-computador, criando experiências imersivas e responsivas para reabilitação, treinamento cognitivo ou entretenimento. Essa integração proporciona uma estimulação cerebral mais rica, favorecendo a neuroplasticidade e acelerando os processos de adaptação neuromotora. Esses ambientes são particularmente úteis em contextos clínicos, como na recuperação de pacientes que sofreram AVC ou lesões na medula espinhal, permitindo simulações controladas de atividades cotidianas com feedback em tempo real (COELHO, 2015).

Por último, Russel et al. (2024) pontuam que, a combinação entre hardware e software em plataformas cada vez mais integradas e modulares marca um novo nível na evolução das neurotecnologias. Já é possível encontrar dispositivos que incorporam sensores de EEG, Bluetooth,

aplicativos móveis com inteligência artificial integrada e interfaces intuitivas. Essa fusão facilita a aceitação da tecnologia tanto por usuários comuns quanto por profissionais de saúde, ao mesmo tempo em que possibilita a coleta contínua de dados para a melhoria dos sistemas. Dessa forma, os avanços em hardware e software não só aumentam a capacidade das ICC, mas também ajudam na sua assimilação gradual no cotidiano das pessoas.

2.3 APLICAÇÕES ATUAIS DAS ICC E DA NEUROTECNOLOGIA

As utilizações na área médica hoje representam uma das seções mais avançadas e promissoras das tecnologias de interface entre cérebro e computador, além da neurotecnologia. Para Zhang et al. (2020), em particular, a aplicação de ICC voltadas para a reabilitação de movimentos tem gerado resultados notáveis em pacientes que sofreram lesões na medula espinhal, acidentes vasculares cerebrais (AVC) e doenças que afetam os músculos. Essas tecnologias permitem que uma pessoa, através da visualização motora, controle próteses robóticas ou estimule seus músculos utilizando sistemas de estimulação elétrica funcional, favorecendo não apenas o movimento, mas também a neuroplasticidade. Muitas vezes, essas abordagens de reabilitação neural revitalizam áreas motoras que foram prejudicadas, ajudando na recuperação parcial ou total das funções. A habilidade de ajustar a tecnologia ao nível clínico e às necessidades individuais do paciente faz das ICC uma ferramenta adaptável e eficiente em tratamentos terapêuticos.

Outro setor importante de acordo com Kamgwan et al. (2022), é o controle de próteses e ortóteses neurais. A tecnologia atual já é capaz de captar sinais do cérebro e converter comandos que movimentam membros artificiais de forma alinhada com as intenções do usuário. Por exemplo, próteses para membros superiores que apresentam sensibilidade ao toque são dirigidas diretamente por sinais oriundos do córtex motor, representando um avanço considerável quando comparadas às próteses mecânicas tradicionais. Essas inovações têm um impacto positivo tanto na funcionalidade quanto na autoconfiança e independência dos usuários, especialmente após amputações. Além disso, estudos estão em andamento para combinar sensores neurais com feedback sensorial, possibilitando que o indivíduo perceba a textura, pressão e temperatura de objetos que são manipulados pela prótese.

É preciso destacar que, a comunicação alternativa é outro elemento em que as ICC têm sido empregadas com êxito, especialmente para aqueles que enfrentam limitações motoras severas, como é o caso de pacientes com esclerose lateral amiotrófica (ELA) ou paralisia cerebral grave. Sistemas que detectam sinais do córtex visual ou motor permitem que essas pessoas selecionem letras, palavras ou ícones apenas através da atividade cerebral, viabilizando a formação de frases e a ligação com o ambiente ao redor. Essa tecnologia, chamada de BCI speller, já está sendo utilizada em dispositivos comerciais que apresentam layouts adaptáveis e a habilidade de aprender os padrões cerebrais do

usuário. Dessa forma, a neurotecnologia está oferecendo uma nova forma de comunicação para aqueles que anteriormente estavam silenciados devido a suas condições neurológicas (ZHANG et al. 2020).

As interfaces entre cérebro e computador têm revelado um imenso potencial para ajudar pessoas com limitações físicas ou neurológicas, favorecendo maior autonomia e qualidade de vida. De acordo com Awuah et al. (2024), para aqueles que sofrem de paralisia nas pernas, por exemplo, sistemas acoplados a exoesqueletos permitem o controle ativo da movimentação, facilitando a reintegração em atividades diárias e sociais. Esses dispositivos são configurados para reagir a sinais que indicam a intenção de andar, emitidos de regiões motoras do cérebro, e podem ser combinados com a estimulação elétrica dos músculos, o que acelera a reabilitação funcional. Em ambientes domésticos, essas tecnologias são adaptadas para assegurar segurança, conforto e independência para o usuário.

No que se refere a deficiências sensoriais, como surdez ou cegueira, a neurotecnologia também contribui significativamente segundo Kamgwan et al. (2022). Os implantes cocleares, que já são bastante comuns, são uma forma estabelecida de interface entre cérebro e tecnologia, convertendo som em impulsos elétricos que estimulam o nervo auditivo diretamente. Recentemente, pesquisas com próteses visuais que se baseiam na estimulação da retina ou do córtex visual têm sido realizadas, visando restaurar parcialmente a visão através da decodificação neural. Apesar de ainda se encontrarem em fase experimental, esses desenvolvimentos sugerem que a mediação da comunicação sensorial por meio de tecnologias neurais está se tornando uma realidade viável para pessoas com deficiências severas.

Além da capacidade de locomoção e da percepção sensorial, Nolêto et al. (2020) citam que, a neurotecnologia também auxilia no gerenciamento de dispositivos do dia a dia, como TVs, celulares, computadores e sistemas de automação residencial. Indivíduos com tetraplegia, por exemplo, já conseguem, por meio de capacetes equipados com sensores de EEG, controlar seu ambiente com simples comandos mentais, como ligar luzes, regular a temperatura ou fazer chamadas. A conexão entre interfaces cérebro-computador e assistentes virtuais, além das tecnologias da Internet das Coisas (IoT), representa um avanço significativo na acessibilidade digital, eliminando barreiras físicas e permitindo que pessoas com limitações na mobilidade tenham maior controle de seu espaço de forma mais autônoma, digna e confortável.

As interfaces cérebro-computador e a neurotecnologia também estão se expandindo para áreas como jogos digitais, educação e entretenimento, onde a intenção principal não é exclusivamente terapêutica, mas sim enriquecimento da interação. No setor de jogos, dispositivos que utilizam EEG já possibilitam que jogadores manipulem elementos do jogo apenas com comandos mentais, dispensando o uso de teclado ou controle. Essa tecnologia proporciona uma imersão sem precedentes, conectando diretamente o cérebro ao ambiente virtual de maneira responsiva. Tais inovações não somente

aprimoram a experiência lúdica, mas também coletam informações valiosas sobre atenção, estresse e engajamento mental, que podem ser aproveitadas para terapias ou treinamentos (VÄRBU et al. 2022).

Na área educacional, Araujo et al. (2024) citam que, a neurotecnologia tem sido utilizada para observar estados mentais como foco, motivação e carga cognitiva durante o aprendizado. Sensores neuronais são integrados a plataformas de ensino digital que se adaptam, em tempo real, ao nível de atenção do aluno, sugerindo ajustes no ritmo, estímulos e conteúdos com base em suas respostas cerebrais. Essa abordagem personalizada tem grande potencial para aumentar a eficácia do processo de ensino e aprendizado, especialmente em contextos de educação especial ou para estudantes com dificuldades de atenção. Além disso, as informações geradas podem ajudar professores a entender melhor os processos mentais envolvidos na aprendizagem.

No setor de entretenimento, a interação entre neurociência e mídias digitais tem possibilitado a criação de experiências interativas que se ajustam ao estado emocional e cognitivo do usuário. Filmes, músicas e ambientes virtuais que reagem à atividade cerebral são apenas alguns exemplos que já estão sendo explorados em protótipos. Há também discussões sobre a possibilidade de desenvolver narrativas dinâmicas em jogos e filmes, que se alteram de acordo com o nível de envolvimento cerebral do espectador. Essa combinação entre mente e mídia expande os horizontes da criatividade e do consumo cultural, abrindo espaço para uma nova maneira de interação onde o cérebro se torna um participante ativo na construção de significado (RUSSEL et al. 2024).

De acordo com Kamgwan et al. (2022), um domínio novo e debatido para a utilização das ICC e da neurotecnologia é sua aplicação em contextos militares e de segurança. Já existem projetos de pesquisa focados em desenvolver sistemas que possibilitem a comunicação direta entre soldados e dispositivos, como drones ou armamentos, utilizando sinais do cérebro. O propósito é agilizar a resposta e aprimorar a precisão das ações no campo, diminuindo o intervalo entre a percepção e a reação. Embora ainda não estejam totalmente operacionais, esses sistemas têm sido submetidos a testes em ambientes controlados e fazem parte dos planos estratégicos de defesa em nações como Estados Unidos, China e Rússia, o que acende um sinal de alerta sobre os perigos associados à militarização de tecnologias delicadas.

Além da gestão de sistemas bélicos, ainda de acordo com Kamgwan et al. (2022), as ICCs estão sendo investigadas para monitorar o estado psicológico de operadores militares, como pilotos ou gerentes de missões críticas. A meta é examinar em tempo real a exaustão, o estresse ou a sobrecarga mental, possibilitando intervenções preventivas que melhorem a segurança e a eficácia operacional. Embora essa aplicação possa ser vantajosa, ela traz à tona questões éticas relacionadas à monitorização mental e à privacidade cognitiva, uma vez que os dados obtidos podem expor estados emocionais ou pensamentos imprevistos. A distinção entre cuidado e controle torna-se difusa, demandando regulamentações específicas e definições claras sobre o manuseio de informações neurais.

Finalmente, na área da segurança pública, tecnologias neurais estão começando a ser analisadas para propósitos de triagem, identificação de mentiras e detecção de intenções hostis, com base na atividade cerebral. Para Zhang et a. (2020), diversas pesquisas tentam descobrir padrões neurais associados a comportamentos arriscados ou intenções criminosas, embora essas abordagens ainda não tenham alcançado um nível de confiabilidade científica, levantando questões ético-legais significativas. A ideia de empregar o cérebro como um meio de evidência ou como um meio de prever comportamentos gera discussões profundas sobre livre-arbítrio, presunção de inocência e os limites da intervenção do Estado na mente humana. Nesse panorama, a neurotecnologia não apenas oferece potencial técnico, mas também impõe um grande desafio normativo e filosófico às sociedades atuais.

2.4 DESAFIOS, LIMITAÇÕES, PERSPECTIVAS FUTURAS E QUESTÕES ÉTICAS DAS ICC

Um dos principais obstáculos para a completa implementação das ICC é a exibição e a confiança nos sinais neurais captados segundo Maiseli et al. (2023). Apesar dos avanços significativos nos métodos de aquisição, os sinais do cérebro continuam sendo extremamente vulneráveis, afetados por interferências tanto internas quanto externas. Técnicas não invasivas, como o EEG, possuem baixa resolução espacial e são muito suscetíveis a ruídos, que podem incluir movimentos oculares, contrações musculares e até mudanças na temperatura do ambiente. Por outro lado, as técnicas invasivas, embora ofereçam maior precisão, apresentam riscos cirúrgicos e complexidade clínica. Essa instabilidade prejudica a precisão na identificação das intenções mentais, comprometendo a performance das ICC em tempo real e restringindo seu uso fora de contextos controlados. Ademais, a variação entre os indivíduos nos padrões neurais torna desafiadora a criação de sistemas universais, exigindo calibração e personalização contínuas para cada usuário.

A complexidade computacional necessária para interpretar os sinais cerebrais representa outro desafio considerável Sun e Ye (2023). O cérebro humano produz uma quantidade enorme de dados em diversas frequências, intensidades e áreas, e a conversão desse fluxo em comandos que possam ser compreendidos por máquinas requer algoritmos extremamente avançados. A extração de características importantes, a remoção de ruídos e a classificação de padrões cerebrais em tempo real necessitam de um processamento potente e de técnicas sofisticadas de inteligência artificial. Mesmo os algoritmos de aprendizado de máquina mais recentes enfrentam dificuldades em se adaptar às variações dos sinais neurais e às alterações no estado mental do usuário, como cansaço, distração ou estresse. Além disso, o treinamento eficiente desses algoritmos demanda conjuntos de dados amplos e de alta qualidade, o que nem sempre está disponível, principalmente no caso de sinais cerebrais de populações específicas, como crianças, idosos ou indivíduos com deficiências neurológicas.

Com relação aos desafios tecnológicos e financeiros, ainda há um longo caminho a ser percorrido para tornar as ICC acessíveis ao público em geral. De aocrdo com Zhang et al. (2020),

muitos dispositivos avançados, especialmente aqueles que utilizam técnicas invasivas ou semi-invasivas, ainda requerem infraestrutura hospitalar, profissionais altamente capacitados e rigorosos protocolos de segurança. Isso limita sua difusão em ambientes do dia a dia, como escolas, lares ou locais de trabalho. Mesmo as versões não invasivas destinadas ao consumo geral ainda necessitam de aperfeiçoamentos em áreas como ergonomia, durabilidade, autonomia energética e conectividade, o que dificulta sua aceitação e adoção ampla. Além disso, a falta de normas internacionais para certificação, regulamentação e interoperabilidade desses sistemas torna sua comercialização e integração com outras tecnologias mais desafiadora.

Sob a perspectiva econômica, a criação, a manutenção e a atualização das tecnologias de interface cérebro-computador apresentam custos elevados, o que limita o seu acesso, especialmente para usuários em nações em desenvolvimento ou com sistemas de saúde debilitados. A produção em larga escala ainda não é suficiente para causar uma diminuição significativa nos preços, e a falta de subsídios ou estímulos por parte do governo também constitui um impedimento à sua adoção ampla. Como resultado, existe o risco de que as neurotecnologias ampliem desigualdades sociais, criando uma nova divisão entre aqueles que conseguem aumentar suas capacidades cognitivas e motoras através da tecnologia e os que permanecem fora desse acesso. Essa potencial desigualdade destaca a urgência de políticas públicas que garantam um acesso justo a essas inovações, especialmente nas áreas fundamentais como a saúde e a educação (MAISELI et al. 2023).

Outro grupo de desafios está relacionado às questões éticas e à proteção da privacidade dos dados neurais segundo Sun e Ye (2023). A captação de sinais do cérebro implica em acessar informações extremamente sensíveis que podem revelar emoções, intenções, preferências e até mesmo pensamentos inconscientes. A possibilidade de que esses dados sejam armazenados, compartilhados ou até mesmo vendidos por empresas que desenvolvem tecnologias neurais suscita preocupações sérias acerca do direito à privacidade e à autodeterminação mental. Diferentemente de outros tipos de dados biométricos, como impressões digitais ou íris, os sinais cerebrais incluem elementos subjetivos e contextuais que podem ser interpretados de maneira ambígua e invasiva. A falta de regulamentações claras sobre a utilização, armazenamento e proteção dessas informações expõe os indivíduos a riscos substanciais de violação de sua liberdade cognitiva.

Além disso, Awuah et al. (2024) pontuam que, a manipulação da atividade cerebral para fins de modulação comportamental, neuroestimulação ou aprimoramento do desempenho gera dilemas éticos profundos. Até que ponto é aceitável interferir na atividade cerebral de um indivíduo, mesmo que ele consinta? Como assegurar que a aplicação dessas tecnologias não comprometa a liberdade ou cause dependência? E como evitar o uso coercitivo ou discriminatório das tecnologias de interface cérebro-computador em contextos como o trabalho, a educação ou o sistema judiciário? Essas e outras questões ainda permanecem sem resposta e indicam que o avanço das tecnologias de interface cérebro-

computador e da neurotecnologia deve ser acompanhado por um diálogo público significativo, por normas legais apropriadas e por uma abordagem ética que coloque a dignidade humana no centro do progresso tecnológico.

As visões futuras para as interfaces entre cérebro e computador, bem como para a neurotecnologia, indicam uma crescente união entre a mente e as máquinas, impulsionada por progressos simultâneos em áreas como neurociência, inteligência artificial e engenharia biomédica. Segundo Kamgwan et al. (2022), as novas tendências envolvem a criação de dispositivos neurais que são mais fáceis de transportar, menos intrusivos e apresentam uma capacidade aprimorada para decodificação em tempo real. As interfaces chamadas híbridas, que misturam sinais neurais com dados musculares ou visuais, prometem aumentar a precisão e funcionalidade dos sistemas. Adicionalmente, a utilização de redes neurais profundas e algoritmos de aprendizado contínuo está tornando essas interfaces mais adaptáveis aos diferentes estados mentais dos usuários, enquanto a miniaturização dos componentes eletrônicos facilita o desenvolvimento de implantes cerebrais mais discretos e duradouros. Com esses avanços, as interfaces tendem a se afastar de ambientes laboratoriais ou clínicos, encontrando espaço em locais do dia a dia, como lares inteligentes, veículos autônomos e dispositivos vestíveis.

Simultaneamente, o domínio da ampliação cognitiva ou neuroenhancement se destaca como uma das aplicações mais promissoras — e controversas — dessa tecnologia. De acordo com Sun e Ye (2023), a possibilidade de aprimorar funções cerebrais como memória, atenção, tomada de decisão ou criatividade através de estimulação elétrica, neurofeedback ou colaboração com sistemas de IA deixou de ser um tema da ficção científica. Estudos recentes já mostram que é viável modular circuitos neurais específicos para melhorar o desempenho em atividades cognitivas ou motoras, abrindo possibilidades não apenas para tratar distúrbios, mas também para melhorar pessoas saudáveis. Essa visão acarreta repercussões significativas em campos como educação, eficiência no trabalho e até em competições esportivas, sugerindo o início de uma nova era em que a cognição humana pode ser ajustada e ampliada conforme a necessidade.

Entretanto, ainda de acordo com Sun e Ye (2023), esse futuro repleto de promessas tecnológicas traz à tona importantes dilemas éticos que não podem ser ignorados. A intervenção direta na atividade cerebral impacta aspectos sensíveis da vida humana, como livre-arbítrio, autenticidade da experiência pessoal e consentimento informado. Até que ponto uma pessoa está realmente ciente das repercussões de uma intervenção neurotecnológica sobre seus pensamentos ou comportamentos? Como garantir que a decisão de utilizar tais tecnologias não seja afetada por pressões sociais ou econômicas? Além disso, a proteção dos dados neurais se torna uma questão crucial, uma vez que essas informações podem expor padrões íntimos de comportamento, emoções e preferências, tornando-se alvos valiosos para exploração comercial ou controle populacional. O perigo de acesso não autorizado, uso impróprio ou

discriminação com base em dados cerebrais demanda o estabelecimento de diretrizes rigorosas para proteção e anonimização.

Diante desse cenário, Kamgwan et al. (20230 citam que, é essencial estabelecer mecanismos sólidos para a regulamentação e supervisão das tecnologias de informação e comunicação (TIC) e da neurotecnologia. Essa estrutura deve ser interdepartamental, incluindo não apenas cientistas e engenheiros, mas também bioeticistas, advogados, profissionais de saúde e membros da sociedade civil. É fundamental criar bases legais que tratem da segurança dos equipamentos, do consentimento ético para seu uso, da responsabilidade diante de falhas e da garantia de acesso justo. Ademais, sugere-se a formação de entidades internacionais para monitorar a implementação dessas tecnologias em âmbito mundial, evitando desigualdades entre nações e prevenindo abusos. A supervisão das TIC deve ser guiada por valores como equidade, clareza, autonomia e beneficência, garantindo que os progressos em neurotecnologia sejam utilizados para melhorar a qualidade de vida das pessoas, em vez de fomentar novas formas de desigualdade, vigilância ou manipulação.

3 CONCLUSÃO

A jornada das ICC e da neurotecnologia constitui uma das áreas mais fascinantes e promissoras da ciência moderna. Ao facilitar a comunicação direta entre o cérebro humano e sistemas computacionais, essas inovações inauguram uma nova era de oportunidades terapêuticas, funcionais e cognitivas. Desde o seu desenvolvimento teórico até as atuais implementações clínicas e experimentais, as ICC têm se revelado ferramentas de imenso valor para a recuperação de pacientes, o suporte a indivíduos com deficiência e a busca por novas formas de interação com o universo digital. O progresso nas técnicas de captação de sinais cerebrais, o aprimoramento dos algoritmos de decodificação e a melhoria dos dispositivos físicos têm permitido uma conexão cada vez mais precisa entre mente e máquina, estabelecendo esse campo como um núcleo estratégico para a inovação científica e tecnológica.

Entretanto, à medida que essas inovações se tornam mais sofisticadas e acessíveis, novos desafios emergem, ultrapassando o aspecto técnico e atingindo fatores éticos, sociais e políticos. As limitações relacionadas à exatidão dos sinais, ao elevado custo de desenvolvimento, à complexidade dos algoritmos e às barreiras de acessibilidade ainda dificultam a plena democratização das ICC. Além disso, as questões éticas envolvendo a manipulação do cérebro, a coleta de dados neurais e a possibilidade de aprimoramento artificial da cognição humana levantam debates urgentes sobre consentimento, privacidade e justiça. O perigo de que essas ferramentas sejam utilizadas de maneira excludente ou até coercitiva requer uma abordagem crítica e responsável, que inclua regulamentações rigorosas e a participação ativa da sociedade civil nas tomadas de decisão.

Assim, o futuro das interfaces cérebro-computador e da neurotecnologia dependerá não apenas das habilidades técnicas de cientistas e engenheiros, mas também do compromisso ético, político e cultural de moldar essas inovações em prol do bem comum. É responsabilidade da comunidade científica, dos formuladores de políticas públicas e dos cidadãos em geral refletir coletivamente sobre as direções desejadas dessa interação entre cérebro e máquina. O progresso sustentável dessas tecnologias pede que a evolução técnica seja acompanhada por proteções legais, transparência social e um profundo respeito pela dignidade humana. Somente desta forma será possível assegurar que o potencial transformador das ICC seja direcionado para promover inclusão, autonomia, saúde e qualidade de vida, e não para aprofundar desigualdades ou comprometer valores fundamentais da humanidade.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, E. M. M.; FROTA, V. B.; OLIVEIRA JUNIOR, A. R. G. et al. A importância do desenvolvimento de tecnologias de interface cérebro-computador (ICC) para alunos com necessidades especiais. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 5, 2024.

AWUAH, W. A.; AHLUWALIA, A.; DARKO, K. et al. Bridging minds and machines: the recent advances of brain-computer interfaces in neurological and neurosurgical applications. **World Neurosurgery**, v. 189, p. 138-153, set. 2024.

COELHO, D. B. Reflexões sobre a interação cérebro-máquina: muito além dos neurônios. **Ciências e Cognição**, v. 6, 2015.

KAMGWAN, N. S.; ASHRAG, G. M.; RAM, V. et al. Brain augmentation and neuroscience technologies: current applications, challenges, ethics and future prospect. **Frontiers in Systems Neuroscience**, v. 16, 2022.

KAWALA-STERNIUK, A. et al. Summary of over fifty years with brain-computer interfaces – A review. **Brain Sciences**, v. 11, n. 1, p. 43, 2021.

KERSANACH, M.; URIBE, L. F. S.; COSTA, T. B. S. Fundamentos do projeto de interfaces cérebro-computador baseadas em imaginação de movimento. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 24., 2016, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: UNICAMP, 2016.

MAISELI, B.; ABDALLA, A. T.; MASSAWE, L. V. et al. Brain–computer interface: trend, challenges, and threats. **Brain Informatics**, v. 10, n. 20, 2023.

MUSSATTO, G. G.; SILVA, S. A. Perspectivas e potencialidades da interface cérebro-máquina. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, n. 13, p. 51-56, 2024.

NOLÊTO, B. C.; CAMPELO, F. R. A. P.; RODRIGUES, K. C. S. et al. Uso da tecnologia Interface Cérebro-Máquina na reabilitação de pacientes. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, e84691110016, 2020.

RUSSEL, J. A.; MUSHFIKA, S.; SERAFEIM, P. Neurotechnology: brain-computer and brain-machine interfaces. **MedLink Neurology**, v. 12, n. 1, 2024.

SOUSA, W. S. M.; LOPES, D. C.; SILVA, D. A. C. et al. Interface cérebro-máquina: avanços na neurociência e o desenvolvimento de bioeletrodos. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, e489111235046, 2022.

SUN, X.; YE, B. The functional differentiation of brain–computer interfaces (BCIs) and its ethical implications. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 10, n. 878, 2023.

VÄRBU, K.; MUHAMMAD, N.; MUHAMMAD, Y. Past, present, and future of EEG-based BCI applications. **Sensors** (Basel), v. 22, n. 9, p. 3331, 2022.

YOUNG, M. J.; LIN, D. J.; HOCHBERG, L. R. Brain-computer interfaces in neurorecovery and neurorehabilitation. **Seminars in Neurology**, v. 41, n. 2, p. 206-216, abr. 2021.

ZHANG, X. et al. The combination of brain-computer interfaces and artificial intelligence: applications and challenges. **Annals of Translational Medicine**, v. 8, n. 11, p. 712, jun. 2020.