

O EEG COMBINADO A OUTRAS TECNOLOGIAS: MÉTODOS DE REABILITAÇÃO NEUROMOTORA

Jacks Renan Neves Fernandes¹;

Instituto Federal de Educação do Piauí (IFPI), Parnaíba, Piauí.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7868-0673>

Francisco Elezier Xavier Magalhães²;

Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr), Parnaíba, Piauí.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8542-4245?lang=en>

Valécia Natália Carvalho da Silva³;

Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr), Parnaíba, Piauí.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5739-0722>

Thayaná Ribeiro Silva Fernandes⁴;

Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr), Parnaíba, Piauí.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6590-4620>

Antônio Thomaz de Oliveira⁵;

Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr), Parnaíba, Piauí.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0277-6833>

Valéria de Fátima Veras de Castro⁶.

Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr), Parnaíba, Piauí.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8281-3029>

RESUMO: O acidente vascular cerebral (AVC) quando não mata pode provocar incapacidade neuromotora. Essa doença neurológica afeta toda a família pela dependência gerada. A reabilitação auxiliada pela eletroencefalografia (EEG) é utilizada na maioria dos casos pela portabilidade e por ser um método não invasivo. A alta demanda por reabilitação e a utilização de várias tecnologias combinadas carece de evidências quanto aos resultados dos tratamentos. O objetivo deste trabalho é revisar a eficácia da reabilitação neuromotora assistida por EEG combinada com outras tecnologias, visando estabelecer padrões de avaliação para melhorar os resultados dos tratamentos. Foi realizada uma revisão em trabalhos entre 2012 e 2022 com foco na reabilitação neuromotora utilizando EEG e tecnologias combinadas. Foram selecionados 19 trabalhos com a utilização do EEG com

tecnologias com *Brain-Computer Interfaces* (BCI), *Robot-Assisted Gait Training* (RAGT), *Virtual Reality* (VR), abordagens com imagética motora e terapia de *neurofeedback*, *feedback* robótico, fNIRS e fMRI, EMG, ECG, RAGT e tDCS. Os resultados indicam que a combinação da EEG com diversas tecnologias, como EMG, BCI, realidade virtual e outras, possui potencial promissor na reabilitação neuromotora de pacientes pós-AVC e com outras disfunções motoras. No entanto, eles também ressaltam a necessidade de padronização nos protocolos de coleta e processamento de biosinais, além de mais pesquisas para validar a eficácia dessas abordagens na prática clínica.

PALAVRAS-CHAVE: Eletroencefalografia. Reabilitação neuromotora. Tecnologias combinadas.

EEG COMBINED WITH OTHER TECHNOLOGIES AND NEUROMOTOR REHABILITATION METHODS

ABSTRACT: Stroke, when not fatal, can lead to neuromotor disability, significantly impacting the entire family due to the dependency it creates. Neuromotor rehabilitation assisted by electroencephalography (EEG) is widely used because of its portability and non-invasive nature. However, the high demand for rehabilitation and various combined technologies require evidence regarding treatment outcomes. This study aims to review the efficacy of neuromotor rehabilitation assisted by EEG and other technologies to establish evaluation standards to improve treatment outcomes. A review of studies published between 2012 and 2022 focused on neuromotor rehabilitation using EEG and combined technologies. Nineteen studies were selected, utilizing EEG in combination with technologies such as Brain-Computer Interfaces (BCI), Robot-Assisted Gait Training (RAGT), Virtual Reality (VR), motor imagery approaches, neurofeedback therapy, robotic feedback, fNIRS, fMRI, EMG, ECG, RAGT, and tDCS. The results indicate that combining EEG with various technologies, including EMG, BCI, virtual reality, and others, shows promising potential in neuromotor rehabilitation for post-stroke patients and those with other motor dysfunctions. However, they also highlight the urgent need for standardization in biosignal collection and processing protocols and further research to validate the efficacy of these approaches in clinical practice.

KEYWORDS: Electroencephalography. Neuromotor Rehabilitation. Combined Technologies.

INTRODUÇÃO

AA Organização Mundial da Saúde (OMS) aponta o acidente vascular cerebral (AVC) como a segunda doença em causa de morte no mundo e a primeira em incapacidade motora. É uma doença neurológica e afeta a mobilidade da pessoa, 50% dos pacientes precisam da família para atividades da vida cotidiana (BERGER et al., 2019). São aproximadamente 13,7 milhões de casos novos por ano de acidente vascular cerebral e com custos relevantes.

Estima-se que 20% das pessoas acometidas pela doença permanecem em cadeiras de rodas e 79% delas tem a capacidade de andar reduzidas (LENNON et al., 2020). Logo, o AVC quando não causa muitas mortes no mundo segundo a OMS, provoca incapacidades (VATINNO et al., 2022).

Nesse contexto, a demanda por reabilitação está crescendo, como também a necessidade de entendimento quanto as melhores práticas no tratamento do AVC a fim de melhor atender aos pacientes com eficiência e eficácia nos resultados. São realizados estudos visando a recuperação motora e novas abordagens são propostas para reabilitação das incapacidades neuromotoras.

Destaque-se nesse processo de recuperação dos pacientes com doenças neuromotoras a EEG, que é um dos procedimentos não invasivos mais utilizados para o acompanhamento da atividade cerebral e baseia-se em alterações de voltagem captadas por vários eletrodos sobre o escalpo (GOMES, 2015). Para execução do exame é necessário um profissional, um amplificador de sinais EEG, eletrodos e computador para armazenamento dos dados (RAMOS, 2017).

A EEG permite avaliar a neuroplasticidade de pacientes auxiliando na reabilitação de funções motoras por meio do movement-related cortical potential (MRCP) onde se verifica as possíveis alterações motoras devido resultado do treinamento (BUTT et al., 2020). Nesse sentido, o EEG registra sinais elétricos no córtex cerebral de forma não invasiva e pode ser utilizada na prática clínica, no auxílio à exames diagnósticos, complementar ao prognóstico em reabilitação convencional e das funções sensorio-motoras combinado ao sistema de Brain-Computer Interfaces (BCIs), Virtual Reality (VR), Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS), Robot-Assisted Gait Training (RAGT), dentre outras tecnologias. Nesse sentido, segundo Babu et.al. (2025), estudos experimentais têm demonstrado a viabilidade do uso de interfaces cérebro-computador baseadas em EEG para o controle direto de dispositivos robóticos com múltiplos graus de liberdade, utilizando arquiteturas de baixo custo integradas a microcontroladores, reforçando o potencial dessas tecnologias em aplicações assistivas e de reabilitação.

O sistema EEG é portátil e de baixo custo, utilizado para avaliar e/ou direcionar o processo de reabilitação de pacientes com incapacidades neuromotoras. Logo, objetivou-se buscar evidências quanto à eficácia do EEG em métodos de reabilitação neuromotora combinado com outras tecnologias, uma vez que, é importante devido a demanda de reabilitação em pacientes pós-AVC, lesão de medula espinal (SCI) e outras deficiências neurológicas. Identificar o uso do EEG na reabilitação neuromotora e descrever os tipos de reabilitação que utiliza o EEG combinado com outras tecnologias.

REFERENCIAL TEÓRICO

O EEG é importante na reabilitação de pacientes com deficiências neuromotoras

pela sua portabilidade, custo e fácil utilização. Clinicamente é viável para acompanhamento no processo de reabilitação e no auxílio de eventuais especificidades de terapias o que permite a individualização da recuperação dos pacientes (SIMIS et al., 2020). Várias são as tecnologias combinadas ao EEG na neuroreabilitação com potenciais benefícios no tratamento de várias disfunções motoras e neurológicas. Relacionou-se as pesquisas incluídas neste trabalho com as tecnologias utilizadas, doenças tratadas e resultados apresentados, conforme (Tabela 1).

Tabela 1: Resumo dos artigos incluídos.

#	Autores	Tecnologias combinadas com EEG	Doenças tratadas	Resultados
1	(LAZAROU et al., 2018)	BCI com base em EEG com três modalidades diferentes de entrada: <i>Slow cortical potentials</i> (SCPs), <i>Sensorimotor rhythms</i> (SMR), <i>Steady state visual evoked potentials</i> (SSVEPs) e P300 que é um tipo de <i>Event-related potential</i> (ERP).	Lesão medular e AVC.	Potencial benefício em pacientes com necessidade de reabilitação motora nas doenças elencadas.
2	(MELINCAK et al., 2016)	BCI e terapia de Neurofeedback (NFB) com imagem motora.	Basicamente AVC e TDAH.	Potencial de evidências positivas na neuroreabilitação e recuperação de pacientes com déficits motores.
3	(BRAMBILLA et al., 2021)	Eletromiografia (EMG) e surface (sEMG).	Pacientes pós-AVC na reabilitação de membros superiores e inferiores.	O uso combinado do EEG/EMG parece ter potencial na reabilitação dos distúrbios neuromotores no tratamento.
4	(AL-QURAIHI et al., 2018)	Dispositivos assistivos para reabilitação, como exoesqueleto de membros superior e inferior, avatar, joelho protético, braço robótico, mão protética	AVC e SCI.	Potencial eficácia na terapia de neuroreabilitação combinando EEG e tecnologias assistivas.
5	(VATINNO et al., 2022)	EEG	AVC isquêmico e hemorrágico	O EEG demonstrou potencial prognóstico observado nas fases aguda e crônica pós-AVC e melhora a capacidade prognóstica em comparação ao preditor convencional clínico.
6	(TEO; CHEW, 2014)	BCI com imagética motora (IM).	AVC	O estudo demonstrou evidências de viabilidade e eficácia do MI-BCI na reabilitação.

7	(LENNON <i>et al.</i> , 2020)	EMG e RAGT.	AVC	O estudo demonstrou resultados promissores para utilização das tecnologias na reabilitação pós-AVC, no entanto, carece de uma padronização do protocolo de coleta e processamento de biossinal para RAGT.
8	(ANSADO <i>et al.</i> , 2021)	BCI, <i>Functional near-infrared spectroscopy</i> (fNIRS), <i>Functional magnetic resonance imaging</i> (fMRI) e Realidade Virtual (RV) combinada com neuroimagem.	Acidente vascular cerebral, lesão cerebral traumática ou transtorno de déficit de atenção.	O estudo demonstrou haver ganhos práticos como o uso da RV na neuroreabilitação, no entanto, no cenário clínico recomenda a individualização da aplicação terapêutica da RV adaptada às limitações do paciente combinada com imagens cerebrais (EEG, fMRI, fNIRS).
9	(ZULAUF-CZAJA <i>et al.</i> , 2021)	BCI e <i>Functional electrical stimulation</i> (FES).	SCI e AVC.	O estudo demonstrou potencial para combinação EEG, BCI e FES como terapia de reabilitação de mão em casa por pessoas com SCI ou AVC.
10	(SIMIS <i>et al.</i> , 2020)	<i>Transcranial direct current stimulation</i> (tDCS) e RAGT.	SCI.	O estudo demonstrou achados significativos na reabilitação de pacientes com lesão medular.
11	(MONGE-PEREIRA <i>et al.</i> , 2017)	BCI	AVC e reabilitação de membros superiores.	O estudo demonstrou que a abordagem EEG/BCI na reabilitação de membros superiores em pacientes pós-AVC parece ser promissora.
12	(ANG <i>et al.</i> , 2015)	BCI, imagens motoras e feedback robótico.	AVC	Foi demonstrado que a terapia com EEG/BCI e imagens motoras apresentou resultados positivos na reabilitação das funções motoras.
13	(PALUMBO <i>et al.</i> , 2021)	EMG, Eletrocardiograma (ECG) e BCI.	Distúrbios do movimento, musculoesqueléticos, doenças neuromotoras.	Apresenta a contribuição dos sistemas de monitoramento fisiológicos na reabilitação com EEG, ECG e em especial o EMG como um dos principais apoios aos profissionais no protocolos de reabilitação e controle de atividade muscular.

14	(CAMARGO-VARGAS; CALLEJAS-CUERVO; MAZZOLENI, 2021)	BCI, RV e imagens motoras.	AVC, disfunções motoras e neurológicas.	Foi demonstrado que a integração de BCIs e neurofeedback na reabilitação potencializa os resultados impactando na qualidade de vida das pessoas com limitações motoras.
15	(BANIQUED <i>et al.</i> , 2021)	BCI com feedback robótico.	AVC	Demonstrou a necessidade de um protocolo padrão para avaliar com precisão evidências quanto eficiência e eficácia na reabilitação assistida por EEG/BCI.
16	(BERGER <i>et al.</i> , 2019)	RAGT e fNIRS.	Neurológicas.	Foi demonstrado que a combinação EEG/fNIRS e o RAGT parece promissora na neuroreabilitação de doenças neurológicas.
17	(BUTT <i>et al.</i> , 2020)	Dispositivo robótico AMADEO (Tyromotion GmbH, Graz, Austria).	AVC	Foi demonstrado a melhora das habilidades motora da mão dos pacientes.
18	(NOJIMA <i>et al.</i> , 2022)	BCI	AVC	Foi demonstrado que a reabilitação assistida pelo sistema EEG/BCI parece ter melhores resultados quando combinada às intervenções convencionais para pacientes com AVC em recuperação motora dos membros superiores.
19	(CARDOSO <i>et al.</i> , 2022)	BCI com IM.	AVC	Foi demonstrado que o sistema EEG/BCI com IM em pacientes pós-AVC produziu atividades corticais relacionadas à tarefa de ciclismo.

Fonte: Os autores.

A ELETROENCEFALOGRAFIA A ELETROMIOGRAFIA

O AVC é uma das doenças que causa mais morte no mundo ou incapacidades neuromusculares e prejudicam sua qualidade de vida mesmo após a reabilitação. Não obstante, a reabilitação é a melhor forma para recuperar a condição física do paciente (TEO; CHEW, 2014). Nesse cenário, existem evidências que a EEG pode auxiliar no prognóstico na reabilitação de pacientes pós-AVC conjuntamente às avaliações clínicas

padrão, principalmente no primeiro mês pós-AVC. No entanto, a função neural é seu preditor mais significativo de desfecho, o que torna o EEG adequado ao medir a atividade elétrica cerebral direta e funcional com uma resolução temporal que captura alterações em milissegundos da atividade cortical, além de não ter contraindicação e ser mais barato que exames similares (VATINNO et al., 2022).

Vários são os tratamentos utilizados combinados com EEG como a reabilitação motora manual padronizada, treinamento de discriminação auditiva, endovascular mecânica, treinamento de rastreamento visuomotor, de realidade virtual, terapia de base semântica/fonológica, de interface cérebro-computador e assistida por robô (VATINNO et al., 2022).

Neste contexto, tecnologias são integradas ao monitoramento eletrofisiológico, como as técnicas quantitativas de EEG e de EMG são utilizadas para coletar sinais biológicos nos níveis cortical e muscular, respectivamente. São exploradas de forma independente, no entanto, mais recentemente, a combinação de ambas as técnicas começou a ser observada como uma possibilidade de abordagem com o objetivo de melhorar a eficácia na reabilitação (BRAMBILLA et al., 2021).

A EEG e a EMG são técnicas que permitem avaliações clínicas do desempenho neuromotor dos pacientes. A EEG registra potencial elétrico de nível cortical e é adequada para um contexto tanto clínico quanto de pesquisa experimental, enquanto a EMG ou surface (sEMG) registra o potencial elétrico da ação muscular. Ambas as técnicas tem características não-invasivas e permitem monitorar integridade/deficiência neuromotora na reabilitação de pacientes (BRAMBILLA et al., 2021).

As direções futuras podem ser orientadas para abordagens multidomínio capazes de explorar todo o potencial da combinação de EEG e EMG, por exemplo, visando uma gama mais ampla de patologias e implementando ensaios clínicos mais estruturados para confirmar os resultados dos estudos pilotos atuais (BRAMBILLA et al., 2021).

A EEG E O SISTEMA DE INTERFACE CÉREBRO-MÁQUINA

O sistema Brain-Computer Interface (BCI) registra a atividade cerebral e extrai sinais que são utilizados para comunicação e reabilitação de pessoas, utilizando pipelines clássicos de aquisição, pré-processamento e extração de características do EEG para tradução dos sinais neurais em comandos de controle (SCHMOIGL-TONIS; SCHRANZ; MÜLLER-PUTZ, 2023). Os sistemas BCI baseados em EEG tem grande potencial para uso clínico generalizado por apresentar uma abordagem não invasiva para pessoas com paralisia grave ou parcial com o objetivo de comunicação e controle com o meio ambiente e a reabilitação motora perdida por algum distúrbio neurológico. Há um aumento da demanda por reabilitação das funções sensório-motoras utilizando sistemas BCIs baseados em EEG não invasivos para abordagens individualizadas, destinadas a ajudar pacientes com deficiências neurológicas graves (LAZAROU et al., 2018).

O sistema BCI/EEG para comunicação, controle e reabilitação tem como usuários potenciais pessoas com esclerose lateral amiotrófica, atrofia muscular espinhal, distrofia muscular de Duchenne, lesão da medula espinhal, paralisia cerebral, esclerose múltipla, malformação de Arnold Chiari, derrame e Parkinson. O sistema BCI/EEG tem, ainda, por base três sinais diferentes de entrada, Event-Related Potentials (ERPs), Slow Cortical Potential (SCPs) e Sensorimotor Rhythm (SMR) alpha (8-12Hz), mu (8-12Hz) e beta (18-26Hz) (LAZAROU et al., 2018).

A comunicação e o controle são realizados por meio de dispositivos computacionais hardware/software como sistemas orientados a testes, web browsers, feedback visual, Graz-BCI, sistemas de movimento do cursor, aplicativos de jogos, ambientes virtuais, controle de dispositivos externos, sistemas ortográficos, aplicativos de pintura. O treinamento e reabilitação são possíveis por meio de IM, reorganização de circuito, apoio à recuperação funcional e substituição funcional. O sistema EEG/BCI tem por fim recuperar o movimento do paciente, promover independência, uma melhor comunicação e integração social (LAZAROU et al., 2018).

EEG/BCI E A ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA FUNCIONAL

O sistema EEG/BCI aliado aos métodos de feedback por Neuromuscular Electrical Stimulation Systems (NMES) e estímulo perceptivo, quando utilizado na reabilitação em treinamento de pacientes pós-AVC na recuperação motora de membros superiores tem maior potencial de melhora quando combinado às intervenções convencionais (NOJIMA et al., 2022).

Como exemplo, foi realizado um estudo de usabilidade em pessoas com lesão medular e acidente vascular cerebral com a combinação de EEG, BCI e Functional Electrical Stimulation (FES) para recuperar a função da mão dos pacientes e, como resultado, os autores encontraram potencial para ser usado para reabilitação destas enfermidades (ZULAUF-CZAJA et al., 2021).

EEG/BCI, IMAGÉTICA MOTORA E TERAPIA DE NEUROFEEDBACK

O sistema BCI que emprega a IM e EEG para retornar o feedback neurofisiológico de uma tarefa motora é bem utilizada pelos seus custos, portabilidade e característica não invasiva (TEO; CHEW, 2014).

Os sistemas EEG/BCI desenvolvidos para a reabilitação motora em pacientes pós-AVC utilizam de IM para simular uma ação motora. Estes sistemas trabalham a neuroplasticidade e são considerados procedimentos alternativos no auxílio à reabilitação neuromotora. Como exemplo, uma pesquisa combinou exercícios de pedaladas e IM com o objetivo de reaprendizagem dos movimentos dos membros inferiores a fim de melhorar a neuroplasticidade. Este estudo em 8 indivíduos saudáveis e 2 pacientes de pós-AVC

demonstrou potencial para reabilitação dos membros inferiores dos pacientes (CARDOSO et al., 2022).

Aplicações de neuroreabilitação usando BCI/EEG explora propriedades neuroplásticas do cérebro na reabilitação motora e parece fornecer evidências positivas na recuperação destes pacientes. No entanto, mesmo com as evidências em adultos, não há muita pesquisa para reabilitação motora e BCI com base em sinais de EEG em crianças (MELINSCAK et al., 2016).

A criança, por ainda estar em desenvolvimento, parece ter potencial em se utilizar da neuroplasticidade e as imagens motoras em aplicações de reabilitação usando BCI/EEG. A intervenção com neuroreabilitação em pouca idade por meio de BCI/EEG é a possibilidade de acesso a todos níveis de carência física. Criar aplicações para reabilitação EEG/BCI para crianças passa por compreender as características implícitas do EEG e suas bandas chaves de frequência, topografia e distribuição de energia conforme idade (MELINSCAK et al., 2016).

EEG/BCI, IMAGÉTICA MOTORA E FEEDBACK ROBÓTICO

Os sinais de EEG são utilizados para o controle de dispositivos assistivos de reabilitação, como exoesqueletos e próteses de membros inferiores e superiores. A reabilitação visa melhorar a qualidade de vida do paciente, restaurando habilidades físicas, neurológicas ou psicológicas. A reabilitação física de forma convencional de um paciente é muito trabalhosa, deste modo, existe uma demanda por tecnologias assistivas que auxiliem o paciente a otimizar sua recuperação (AL-QURAIISHI et al., 2018).

O EEG tem papel fundamental nessa vertente de reabilitação com tecnologias assistivas. Vários sinais de EEG são utilizados para controlar dispositivos assistivos como sensorimotor rhythms (SMR), movement-related cortical potentials (MRCP), event-related desynchronization (ERD), event-related synchronization (ERS). Os dispositivos assistivos mais comuns são exoesqueleto de membros superior e inferior, avatar, joelho protético, braço robótico, mão protética. O controle destes dispositivos é baseado em EEG e às vezes junto ao EMG, eletro-oculografia ou goniômetro. Quanto às principais tarefas de movimento realizadas, 57% é por IM utilizando 68% dos sinais ERD/ERS do EEG e 35% é por execução de movimento utilizando 18% dos sinais de MRCP do EEG nos trabalhos selecionados no estudo (AL-QURAIISHI et al., 2018).

A IM e uma intervenção BCI com EEG parece ser uma atividade potencial no auxílio à reabilitação assistida por robô e feedback robótico. Os pesquisadores avaliaram o sistema EEG/BCI com imagens motoras e dividiram o estudo em dois grupos BCI-Manus e Manus. BCI-Manus com intervenção baseado em EEG/BCI e imagens motoras com feedback robótico e Manus que usou o robô comercial MIT-Manus denominado pelos pesquisadores como BCI-Manus system (Interactive Motion Technologies USA, Watertown,

MA) e constituiu-se de exercícios com feedback visual do robô Manus. Como resultado a terapia apresentou resultados positivos com mais de 60% dos pacientes alcançando melhorias nas funções motoras (ANG et al., 2015).

Um estudo de revisão sistemática avaliou sistemas BCI assistidos por robô na reabilitação motora associada ao movimento das mãos de pacientes pós-AVC. Os autores encontraram melhorias estatisticamente relevantes em relação ao controle na maioria dos estudos selecionados, no entanto, demonstraram a necessidade de desenvolvimento de um protocolo padrão para avaliar a eficiência e eficácia dessas tecnologias (BANIQUED et al., 2021). Em outro estudo experimental os autores utilizaram um dispositivo robótico denominado AMADEO em um programa de reabilitação assistida em pacientes pós-AVC utilizando EEG. Como resultados os pacientes apresentaram relevante recuperação motora funcional da mão após 8 semanas de treinamento (BUTT et al., 2020).

EEG/BCI, REALIDADE VIRTUAL, IMAGÉTICA MOTORA, fNIRS e fMRI

Os sistemas BCI/EEG tem evoluído nas últimas décadas principalmente no suporte ao processo de reabilitação de membros superiores e inferiores do corpo humano. Estes sistemas em conjunto com equipamentos não invasivos, com baixo custo, de boa resolução, usabilidade e portabilidade, demonstram potencial na reabilitação neuromotora, principalmente quando empregam realidade virtual e são apoiados em feedback com estimulação visual, auditiva, háptica (CAMARGO-VARGAS; CALLEJAS-CUERVO; MAZZOLENI, 2021).

A realidade virtual (RV) na reabilitação é uma ferramenta com resultados já demonstrados na literatura científica. Não obstante, os programas de RV são mais utilizados para melhorar tarefas de funções cognitivas, no entanto, com a combinação de RV e a neuroimagem pode-se avaliar a evolução de treinamento com RV na neuroreabilitação motora. Várias técnicas de neuroimagens são utilizadas com EEG e RV como o treinamento de neurofeedback, treinamento motor, treinamento de movimentos, interação visual, auditiva e hápticas. O EEG auxilia no treinamento de RV com o monitoramento simultâneo do paciente que fornece dados ao BCI, ajudando a melhorar na reabilitação cognitiva e motora de pacientes (ANSADO et al., 2021).

Combinar EEG, BCI, RV com neuroimagem permite conhecer as áreas corticais que respondem à estimulação na neuroreabilitação. As técnicas de neuroimagem comumente utilizadas são funcional magnetic resonance imaging (fMRI), functional near infrared spectroscopy (fNIRS) e EEG. Estas técnicas podem avaliar o impacto do treinamento com RV e a combinação delas pode determinar biomarcadores que auxiliam o prognóstico da reabilitação, principalmente em pacientes no pós-AVC, lesão cerebral traumática (TCE), transtorno do déficit de atenção (TDAH) (ANSADO et al., 2021).

A união do EEG-fNIRS parece ter o potencial de caracterizar as informações

espaço-temporais associadas a distúrbios da marcha em pacientes na reabilitação com RAGT (treinamento de marcha assistida por robô), melhorando o resultado e a eficácia do tratamento de doenças neurológicas (BERGER et al., 2019).

EEG/BCI, EMG e ECG

Vários são os avanços na EEG, EMG e ECG principalmente pelos benefícios na reabilitação de distúrbios do movimento. São também utilizados como sensores vestíveis e dispositivos portáteis pois impulsionam o monitoramento na reabilitação clínica e médica, como: monitorar a reabilitação no ambiente de fisioterapia, monitorar uma intervenção pós-cirúrgica, monitorar a mobilidade de um paciente, detectar riscos, monitorar a tarefa de reabilitação em pacientes com doenças crônicas. São dispositivos que fornecem bio-sinais que são gerados pelo cérebro, músculos e coração, caracterizados como sinais elétricos de baixas amplitude e frequência (PALUMBO *et al.*, 2021).

EEG/BCI, RAGT e EMG

O AVC é uma doença com alta taxa de incapacidade relacionada e na reabilitação, o treinamento de marcha assistida por robô (RAGT) baseado em EEG e/ou EMG é uma técnica para a reeducação da marcha pós AVC. Fornecer os exercícios ao paciente e sua intensidade está associado aos resultados funcionais da marcha, assim, a dosagem proporcional à evolução é o ponto crítico na reabilitação convencional. No entanto, o RAGT permite aos pacientes a prática da marcha com assistência eletromecânica, o que parece superar as dificuldades da reabilitação usual, uma vez que, a interface neural auxiliada por EEG e/ou EMG fornece feedback adequado ao redirecionamento necessário da tarefa ou treinamento (LENNON et al., 2020).

A reabilitação para pacientes dependentes fisicamente é um desafio quanto ao volume de treinamento. Nesse contexto, o RAGT demonstrou bons resultados por individualizar as dosagens dos exercícios (LENNON et al., 2020).

EEG/BCI, RAGT e tDCS

Foi realizado um estudo randomizado de análise neurofisiológica com 39 pacientes com SCI onde receberam 30 sessões de tDCS ou simulação na área motora primária em conjunto com RAGT. O EEG foi utilizado para analisar o espectro de potência e a modulação relacionada à tarefa associado à função da marcha determinado pelo índice Walk Index for Spinal Cord Injury (WISCI-II). Como resultado, nas oscilações da frequência beta do EEG no córtex sensório-motor desses indivíduos parece ser um tipo de organização compensatória que aumenta a plasticidade local, logo, intervenções com tDCS combinado com RAGT também permitem um aumento da ativação na área sensório-motora que leva à melhora

da marcha e por conseguinte a diminuição da potência beta alta, o que permite inferir que as oscilações da banda beta possivelmente são biomarcadores da função da marcha e reabilitação de pessoas com SCI (SIMIS et al., 2020).

METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa com abordagem qualitativa, exploratória. A pesquisa recuperou artigos, no período entre 2012 e 2022, nas bases de dados *online* PubMed, ISI Web of Science e Scopus. Utilizou-se *strings* de busca na PubMed ((*Rehabilitation*) OR (*Movements*)) AND ((*Electroencephalography*) OR (*Electroencephalogram*) OR (EEG)) AND (*motor*), na ISI Web of Science utilizou-se *Rehabilitation* AND (EEG OR *Electroencephalogra**), e na Scopus *Movement* AND *Rehabilitation* AND (EEG OR *Electroencephalogra**), recuperando um total de 125 artigos, 78 na base PubMed, 26 da ISI *Web of Science* e 21 da Scopus. Foram removidos 13 artigos duplicados, 61 foram rejeitados a partir da leitura de título e resumo e 32 rejeitados após leitura na íntegra, perfazendo um total de 19 artigos incluídos no trabalho.

Os critérios de seleção quanto à inclusão foram estudos que propuseram ou relataram processos de reabilitação neuromotora com utilização de EEG. Os critérios de exclusão foram artigos incompletos, com acesso fechado, não escrito em inglês, não revisado por pares e publicados antes de 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eletroencefalografia foi combinada a várias tecnologias, como EMG, ECG, BCI, RV, RAGT, FES, tDCS, fNIRS, fMRI, imagética motora e feedback robótico, a fim de melhorar métodos de reabilitação neuromotora. Pela observação dos aspectos analisados, todas com potencial ainda a ser explorado no processo de reabilitação neuromotora de AVC, SCI e outras disfunções motoras ou neurológicas. As evidências quanto aos benefícios do da EEG combinada à outras tecnologias nos tratamentos de reabilitação em pacientes pós-AVC, SCI e outras doenças neuromotoras demonstram potencial. Os resultados são promissores, no entanto, parece ser necessário estabelecer padrões para avaliar de forma mais eficaz essas abordagens e suas tecnologias a fim de buscar melhores indicativos quanto à eficiência e eficácia.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Nós, autores deste artigo, declaramos que não possuímos conflitos de interesses de ordem financeira, comercial, político, acadêmico e pessoal.

REFERÊNCIAS

- AL-QURAISHI, M. S. et al. **EEG-based control for upper and lower limb exoskeletons and prostheses: a systematic review.** *Sensors*, v. 18, n. 10, p. 3342, 7 out. 2018.
- ANG, K. K. et al. **A randomized controlled trial of EEG-based motor imagery brain-computer interface robotic rehabilitation for stroke.** *Clinical EEG and Neuroscience*, v. 46, n. 4, p. 310–320, 1 out. 2015.
- ANSADO, J. et al. **How brain imaging provides predictive biomarkers for therapeutic success in the context of virtual reality cognitive training.** *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, v. 120, p. 583–594, 1 jan. 2021.
- BABU, T. K.; EDLA, D. R.; DARA, S. **A survey on neural prosthetic devices using EEG signal classification.** In: *International Conference on Research Methodologies in Knowledge Management, Artificial Intelligence and Telecommunication Engineering (RMKMATE)*, 2., 2025. Anais [...]. p. 1–8, 25 jun. 2025.
- BANIQUED, P. D. E. et al. **Brain–computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review.** *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, v. 18, n. 1, p. 1–25, 1 dez. 2021.
- BERGER, A. et al. **Current state and future prospects of EEG and fNIRS in robot-assisted gait rehabilitation: a brief review.** *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 13, p. 172, 1 fev. 2019.
- BRAMBILLA, C. et al. **Combined use of EMG and EEG techniques for neuromotor assessment in rehabilitative applications: a systematic review.** *Sensors*, v. 21, n. 21, p. 7014, 22 out. 2021.
- BUTT, M. et al. **Assessment of neuroplasticity using EEG signal in rehabilitation of brain stem stroke patients.** In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2020. Anais [...], 30 ago. 2020.
- CAMARGO-VARGAS, D.; CALLEJAS-CUERVO, M.; MAZZOLENI, S. **Brain-computer interfaces systems for upper and lower limb rehabilitation: a systematic review.** *Sensors*, v. 21, n. 13, p. 4312, 24 jun. 2021.
- CARDOSO, V. F. et al. **BCI based on pedal end-effector triggered through pedaling imagery to promote excitability over the feet motor area.** *Research on Biomedical Engineering*, p. 1–11, 27 jan. 2022.
- GOMES, M. **Bases fisiológicas do eletroencefalograma.** *Rev. Bras. Neurol.*, v. 51, n. 1, p. 12–7, 2015.
- LAZAROU, I. et al. **EEG-based brain–computer interfaces for communication and rehabilitation of people with motor impairment: a novel approach of the 21st century.** *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 12, p. 14, 31 jan. 2018.
- LENNON, O. et al. **A systematic review establishing the current state-of-the-art, the limitations, and the desired checklist in studies of direct neural interfacing with robotic gait devices in stroke rehabilitation.** *Frontiers in Neuroscience*, v. 14, p. 578, 2020.
- MELINSCAK, F. et al. **Expanding the (kaleido)scope: exploring current literature trends for translating electroencephalography (EEG) based brain–computer interfaces for motor rehabilitation in children.** *Journal of Neural Engineering*, v. 13, n. 6, p. 061002, 20 out. 2016.
- MONGE-PEREIRA, E. et al. **Use of electroencephalography brain-computer interface systems as a rehabilitative approach for upper limb function after a stroke: a systematic**

review. *PM&R*, v. 9, n. 9, p. 918–932, 1 set. 2017.

NOJIMA, I. et al. **Brain–computer interface training based on brain activity can induce motor recovery in patients with stroke: a meta-analysis.** *Neurorehabilitation and Neural Repair*, v. 36, n. 2, p. 83–96, 1 fev. 2022.

PALUMBO, A. et al. **Biopotential signal monitoring systems in rehabilitation: a review.** *Sensors*, v. 21, n. 21, p. 7172, 28 out. 2021.

RAMOS, Camila Davi. **Caracterização do eletroencefalograma normal em situação de vigília: elaboração da base de dados e análise quantitativa.** 2017. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SCHMOIGL-TONIS, M.; SCHRANZ, C.; MÜLLER-PUTZ, G. R. **Methods for motion artifact reduction in online brain-computer interface experiments: a systematic review.** *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 17, 2023.

SIMIS, M. et al. **Beta-band oscillations as a biomarker of gait recovery in spinal cord injury patients: a quantitative electroencephalography analysis.** *Clinical Neurophysiology*, v. 131, n. 8, p. 1806–1814, 1 ago. 2020.

TEO, W. P.; CHEW, E. **Is motor-imagery brain-computer interface feasible in stroke rehabilitation?** *PM&R*, v. 6, n. 8, p. 723–728, 1 ago. 2014.

VATINNO, A. A. et al. **The prognostic utility of electroencephalography in stroke recovery: a systematic review and meta-analysis.** *Neurorehabilitation and Neural Repair*, v. 36, n. 4–5, p. 255–268, 20 abr. 2022.

ZULAUF-CZAJA, A. et al. **On the way home: a BCI-FES hand therapy self-managed by sub-acute SCI participants and their caregivers: a usability study.** *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, v. 18, n. 1, p. 1–18, 1 dez. 2021.