

Interface cérebro-máquina: avanços na neurociência e o desenvolvimento de bioeletrodos

Brain-machine interface: advances in neuroscience and the development of bioelectrodes

Interfaz cerebro-máquina: avances en neurociencia y desarrollo de bioelectrodos

Recebido: 07/09/2022 | Revisado: 13/09/2022 | Aceitado: 14/09/2022 | Publicado: 22/09/2022

Wanderson Silva Macedo de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4474-5667>
Centro Universitário Uninovafapi, Brasil
E-mail: wandersonsousa8@hotmail.com

Danielle Costa Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7382-1323>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: dany197_@hotmail.com

Diego Agripino Chagas Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8437-4648>
Centro Universitário Uninovafapi, Brasil
E-mail: diego.francisca@hotmail.com

Ana Cláudia de Miranda Adad

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6257-3790>
Centro Universitário Uninovafapi, Brasil
E-mail: anacadad10@gmail.com

Jonatas Paulino da Cunha Monteiro Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0106-1345>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: jonatasmonteirofnt@gmail.com

Lyslly Rhanny Soares De Deus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4367-5609>
Centro Universitário Facid | Devry, Brasil
E-mail: lysllyrhanny@hotmail.com

Gabriela Veiga Macêdo e Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3424-5466>
Centro Universitário Uninovafapi, Brasil
E-mail: gabriela.vmea@outlook.com

Matheus Sam do Santos Lemos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1098-1864>
Centro Universitário Uninovafapi, Brasil
E-mail: matheusxsam@hotmail.com

Tayane de Jesus Bispo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2246-188X>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: tayane99@academico.ufs.br

Celina Araújo Veras

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6542-0888>
Universidade Estadual do Piauí, Brasil
E-mail: celinaveras22@outlook.com

Resumo

Objetivo: Mostrar sobre as atualizações desse campo de pesquisa nos últimos anos. *Metodologia:* trata-se de uma revisão narrativa que são publicações mais amplas. Foram realizadas buscas na base de dados Pubmed e na Biblioteca Virtual em Saúde (BVS). Utilizou-se os Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e Medical Subject Headings (MeSH): “Brain-Computer Interfaces”, “Nervous System”, “Cerebrum” e “Neurosciences.” Incluíram-se artigos publicados entre os anos de 2017 e 2022, em português e inglês e que abordassem avanços da interface cérebro-máquina. *Resultados:* Foram encontrados 17 artigos que se encaixaram nos critérios de inclusão, todos em inglês. As pesquisas demonstraram avanços significativos que podem ser empregados em processos de reabilitação física motora e sensorial. *Conclusão:* Verificou-se a aplicação de protocolos e métodos diferentes, o que pode ser um empecilho para a replicação de futuros estudos, no entanto também houve avanços no desenvolvimento de eletrodos biocompatíveis a partir de prolongamentos

de axônios, que podem diminuir o processo inflamatório em implantes intracorticais e, observou-se, também, o aprimoramento de codificação e decodificação por métodos não invasivos acoplados em diferentes partes do corpo.

Palavras-chave: Neurociências; Neurologia; Reabilitação.

Abstract

Objective: To show the updates in this field of research in recent years. *Methodology:* This is a narrative review, which consist of more extensive publications. The Pubmed database and the Virtual Health Library (VHL) were used to search for articles. The following Health Sciences Descriptors (DeCS) and Medical Subject Headings (MeSH) were used : "Brain-Computer Interfaces", "Nervous System", "Cerebrum" and "Neurosciences." Articles published between the years 2017 and 2022, in Portuguese and English addressing brain-machine interface advances were included. *Results:* 17 articles were found that fit the inclusion criteria, all in English. The research demonstrated significant advances that can be employed in physical motor and sensory rehabilitation processes. *Conclusion:* The application of different protocols and methods was verified, which can be a hindrance to the replication of future studies; however, there were also advances in the development of biocompatible electrodes from axon extensions, which can reduce the inflammatory process in intracortical implants, and the improvement of coding and decoding by non-invasive methods coupled to different parts of the body.

Keywords: Neurosciences; Neurology; Rehabilitation.

Resumen

Objetivo: Presentar acerca de las actualizaciones de este campo de investigación en los últimos años. *Metodología:* Se trata de una revisión narrativa que son publicaciones más amplias. Se realizaron búsquedas en las bases de datos PubMed y en la Biblioteca Virtual en Salud (BVS). Se utilizó los descriptores en ciencias de salud (DeCS) y Medical Subject Headings (MeSH): "Brain-Computer Interfaces", "Nervous System", "Cerebrum" e "Neurosciences." Fueron incluidos artículos publicados entre los años de 2017 y 2022, en portugués e inglés y que abordasen avances de la interfaz cerebro-máquina. *Resultados:* Fueron encontrados 17 artículos que se encajaron en los criterios de inclusión, todos en inglés. Las investigaciones demostraron avances significativos que pueden ser empleados en procesos de rehabilitación física, motora y sensorial. *Conclusión:* Se verificó la aplicación de protocolos y método diferentes, lo que puede ser un escollo para la replicación de futuros estudios; sin embargo, también hubiera avances en lo desenvolvimiento de electrodos biocompatibles a partir de prolongamientos de axones, que pueda disminuir el proceso inflamatorio en implantes intracorticales, y el perfeccionamiento de codificación y decodificación por métodos no invasivos acoplados en diferentes partes del cuerpo.

Palabras clave: Neurociencias; Neurología; Rehabilitación.

1. Introdução

A neurofisiologia do ser humano, que funciona por meio de impulsos eletroquímicos, realizados por potenciais de ação, possui células especializadas: os neurônios, e cada neurônio possui uma função específica que promove a funcionalidade do sistema nervoso em diversos aspectos, como: a motricidade, a linguagem, as emoções, a cognição, o surgimento abstrato da mente e a consciência nos seres humanos. (Souza et al., 2015).

Com base nisso, a revolução da robótica e avanços de conhecimentos nas neurociências, possibilitaram a aplicabilidade desse sistema fisiológico, gerador de impulsos nervosos na reprodução de movimentos externos, isto é, para máquinas que receberem ordens do encéfalo, tal revolução gerou uma maior interação entres esses dispositivos. Tal fato se deu a partir de algoritmos para reabilitação de pessoas com deficiência física, com apoio de próteses, de forma mais elaborada utilizando-se de exoesqueletos que permitem que pacientes cadeirantes possam andar de forma independente. (Souza et al., 2015 & Souza et al., 2022).

A interface cérebro-máquina (ICM) baseia-se na atividade cerebral que pode ser adquirida por métodos que quantificam a atividade do sistema nervoso, como: eletroencefalografia (EEG); magnetoencefalografia (MEG); imagem de ressonância magnética funcional (fMRI) e tomografia por emissão de pósitron (PET). Após os registros da atividade cerebral, a ICM transforma esse padrão neuronal em um comando externo, e isso ocorre em quatro etapas básicas: aquisição de sinais, extração de característica, classificação e comando de dispositivo. (Pinto, 2011 & Melo, 2011).

A ICM traduz as informações de controle e sensoriais para aplicações, ela serve como um meio alternativo à comunicação natural, tornando-se um sistema artificial que contorna vias eferentes do corpo. Ela subdivide-se em dois métodos

de utilização: método invasivo, que é uma técnica que implanta eletrodos no córtex que irão registrar sinais com maior precisão e qualidade, colocados por meio de neurocirurgia com risco maior; outro método é não-invasiva que se baseia no registro de sinais, principalmente, do EEG, com eletrodos distribuídos por toda a calota craniana ou em outras partes do corpo e que mapeia a atividade eletrofisiológica do cérebro. (Schuh et al., 2013).

Dessa forma, o objetivo deste artigo é mostrar sobre as atualizações desse campo de pesquisa nos últimos anos, por meio de uma revisão narrativa. Essa área da neurociência, juntamente com outras áreas do conhecimento, como a robótica, a engenharia robótica, a engenharia elétrica e a engenharia mecânica, tem se mostrado promissora para a reabilitação de pessoas com paraplegia severa, tetraplegia e doenças neurodegenerativas (Kellmeyer et al., 2018). Além disso, possui aplicabilidade para outros setores como o industrial e o militar.

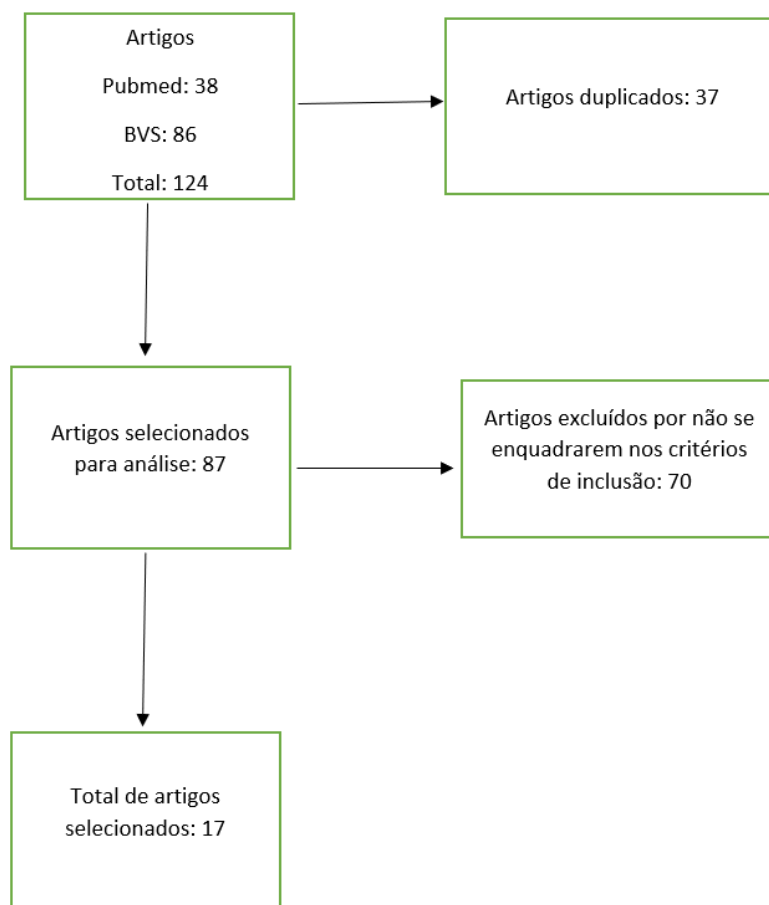
2. Metodologia

Este artigo trata-se de uma revisão narrativa que, de acordo com Rother(2007), são publicações mais amplas e que não exigem critérios de investigações rigorosas e seleções de estudos. No entanto, o objetivo desta pesquisa é de atualização na área de neurociência no campo de investigação de interface cérebro-máquina, por isso, para deixar o estudo mais rigoroso, os autores decidiram estabelecer critérios para este artigo.

A priori, foram estabelecidos artigos publicados nos últimos cinco anos, nos idiomas português e inglês. Para tanto, foram realizadas buscas na base de dados Pubmed e na Biblioteca Virtual em Saúde (BVS). Utilizou-se os Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e Medical Subject Headings(MeSH): “Brain-Computer Interfaces”, “Nervous System”, “Cerebrum” e “Neurosciences.”

Os critérios de inclusão configuraram-se em artigos publicados na integra, revisões, ensaios clínicos, estudos com humanos e animais, ocorreu, portanto, a utilização do método de interface cérebro-máquina. Os critérios de exclusão foram a eliminação de revistas não científicas, notícias, teses, preprints, mini revisões, artigos pagos e artigos incompletos. Após a seleção do material, os dados foram extraídos e compilados no Excel. A Figura 1 mostra a seleção dos artigos:

Figura 1. Processo de seleção de artigos.



Fonte: Autores (2022).

3. Resultados

Após a exclusão dos artigos, foram selecionados 17 que informam sobre os últimos avanços da interface cérebro-máquina. Com base nos artigos, os avanços foram significativos para diversos pacientes com lesões neurológicas e doenças neurodegenerativas, com capacidade intensa para promover uma melhor qualidade de vida e independência parcial em diversos setores socioeconômicos. A seguir, o Quadro 1 mostra as principais características dos estudos incluídos:

Quadro 1. Dados dos artigos.

Autores	Objetivo	Tipo de estudo	Metodologia
Wen., et al(2021)	Analisar e caracterizar o desenvolvimento e aplicação do novo sistema de treinamento (ICM-VR) na reabilitação de doenças neurológicas na perspectiva do paradigma ICM.	Revisão Sistemática	Envolveu uma busca no Web of Science-Science Citation Index/Social Sciences Citation Index e nos bancos de dados da China National Knowledge Infrastructure; 39 trabalhos foram selecionados. Vantagens e desafios da reabilitação neurológica baseada em BCI-VR foram analisados em detalhes.
Wang & Tsai (2022)	Melhorar a extração de dados.	Ensaio clínico	Pacientes com AVC submetidos à ICM, para reabilitação de membros superiores.
Tang., et al (2018)	Desenvolvimento de cadeira de rodas inteligente.	Ensaio clínico	ICM baseado no P300, os pacientes foram treinados para a utilização com comandos específicos.
Luan., et al(2020)	Apresentar os últimos avanços na área de ICM.	Revisão sistemática	Busca em bases de dados internacionais.
Romagosa., et al(2020)	Restaurar a função neurológica por meio da plasticidade neuronal.	Ensaio clínico	Cinquenta e um pacientes com acidente vascular cerebral com hemiparesia da extremidade superior foram recrutados. Todos os participantes realizaram 25 sessões com o MI BCI e visitas de avaliação para acompanhar as alterações funcionais antes e após a terapia.
Serruya., et al(2018)	Produzir eletrodos biocompatíveis	Análise experimental	Produção de eletrodos biocompatíveis a partir de células troncos e de outros axônios existentes no sistema nervoso.
Loza., et al(2019)	Projetar um ICM mais preciso para transferência e processamento de informações neuronais.	Ensaio clínico	O estudo foi composto por 3 participantes do sexo masculino e 3 do sexo feminino na faixa etária de 22 a 40 anos. Todos os seis indivíduos, que sofriam de epilepsia medicamente intratável, estavam sendo submetidos a monitoramento invasivo de eletrodo subdural antes da ressecção. Uma grade frontal de 32 contatos padrão (espaçamento entre eletrodos de 1 cm) e uma grade temporal de 96 contatos de alta densidade (espaçamento entre eletrodos de 0,5 cm).
Barria., et al(2021)	Apresentar a ICM associado a estímulos visuais e hápticos para a geração de imagens motoras e controle de exoesqueleto no tornozelo.	Ensaio clínico	Cinco pacientes pós-AVC (55-63 anos) foram submetidos a três estratégias diferentes usando T-FLEX: terapia estacionária (TS) sem imaginação motora, imaginação motora com estimulação visual (MIV) e imaginação motora com indução visual-háptica (MIVH).
Risso., et al(2019)	Investigar qual melhor feedback para integração com a ICM.	Caso clínico	Utilização de prótese bidirecional, com eletromiografia de superfície.
Twardowski., et al(2019)	Desenvolver uma interface neural com processamento em tempo real.	Ensaio clínico	Um total de 23 indivíduos se voluntariaram para participar: 13 indivíduos eram amputados com perda de membro transradial, aplicando uma tecnologia desenvolvida pela equipe (MU Drive).
Jochumsen., et al(2018)	Investigar a indução de plasticidade quando movimentos imaginados são detectados em um sistema ICM auto-ritmado e emparelhado com: (1) estimulação elétrica nervosa de pulso único, (2) movimento passivo através de um dispositivo ortopédico motorizado, e (3) a combinação de estimulação elétrica nervosa e movimento passivo.	Ensaio clínico	Doze participantes saudáveis foram incluídos no estudo. O experimento foi dividido em três sessões experimentais que seguiram a mesma estrutura onde a única diferença foi o tipo de feedback aferente: (1) estimulação elétrica nervosa acionada por ICM, (2) movimentos passivos acionados por ICM e (3) ICM- estimulação elétrica nervosa desencadeada e movimento passivo.

Hu., et al(2018)	Explorar a possibilidade de usar gravações de ECoG de alta densidade movimentos de braço de alcance-retorno funcionalmente irrestritos realizados por macacos rhesus.	Análise experimental	Os macacos estavam sentados com a cabeça fixa em uma cadeira de contenção de primatas personalizada, de frente para o experimentador. O headstage sem fio foi conectado e tanto a gravação de vídeo quanto a aquisição do sinal neural, foram sincronizadas com o uso de um acionador de sinal analógico. Os macacos foram treinados para usar apenas a mão contralateral ao hemisfério implantado. O experimento foi repetido ao longo de 10 dias, com um mínimo de 80 tentativas/dia.
Maghsoudi & Shalhaf(2022)	Identificar um conjunto de recursos de conectividade efetiva robustos e discriminativos de sinais de EEG e desenvolver uma estrutura hierárquica de aprendizado de máquina para discriminação de tarefas de MI esquerda e direita de forma eficaz.	Estudo analítico	Participaram 29 indivíduos saudáveis sem doenças relacionadas ao cérebro relatadas. Os dados de EEG foram registrados a uma taxa de amostragem de 1000 Hz com trinta eletrodos de acordo com o sistema internacional 10-5 com Fz como eletrodo terra. Os sujeitos sentaram-se em uma poltrona em frente a uma tela branca de 50 polegadas com distância de 1,6 m e sem qualquer movimento do corpo. O experimento incluiu três sessões de MI de mão esquerda e direita.
Escobar & Negrete(2020)	Apresentar atualizações sobre a ICM em pacientes com AVC.	Revisão da literatura	Revisão da literatura atualizada sobre a BCI aplicada à reabilitação do AVC de membros superiores. Tal pesquisa foi realizada classificando os estudos que usaram diferentes tipos de feedback da BCI em 3 categorias: visual, dispositivos robóticos e EENM. A pesquisa foi realizada nas bases de dados PUBMED, Web of Science, Sciencedirect, Spingerlink, IOPscience, Taylor & Francis, Hindawi e IEEE Xplore. Para que os estudos fossem incluídos na revisão atual, os testes com feedback fornecido aos pacientes tiveram que ser relatados.
Araki., et al(2020)	Usar o eletrodo de condutor elástico e transparente combinado com nanofios de prata(AgNW) banhado a Au para registrar sem fio um ECoG para implantação de longo prazo.	Estudo experimental	Síntese de AgNW e fios para alta transmitância e baixa turbidez, hibridização por luz pulsada de alta intensidade (HIPL) para aumentar a estabilidade mecânica e tratamentos via chapeamento Au para aumentar a confiabilidade elétrica. A fabricação envolveu um processo de baixa temperatura que não submeteu o substrato ao aumento de pressão.
Stavisky., et al(2017)	Investigar como o córtex motor previne mudanças em sua atividade após perturbações do movimento de “vazar” prematuramente para alvos a jusante antes que a saída de movimento corretivo apropriado esteja pronta.	Análise experimental	Três macacos rhesus machos adultos (macacos J, L e R) foram treinados para sentar com a cabeça fixa em uma cadeira de primata e realizar tarefas de aquisição de alvos 2D controlando a velocidade de um cursor na tela com os movimentos das mãos ('controlado pelo braço') ou através de um ICM ('controlado pelo ICM). Na ocasião, implantou-se com matrizes de 96 eletrodos (eletrodos de 1 mm espaçados 400 µm, Blackrock Microsystems) usando técnicas neurocirúrgicas padrão.
Cheng., et al (2017)	Investigar o efeito do padrão facial semitransparente (STF-P) (o sujeito podia ver o caractere alvo quando os estímulos eram exibidos) e o padrão facial tradicional (FP) (o sujeito não podia ver o caractere alvo quando os estímulos piscavam) sobre o desempenho do ICM.	Ensaio clínico	Dez indivíduos saudáveis participaram deste estudo. Os sujeitos sentaram-se em uma cadeira em frente ao monitor, que exibia uma matriz 6 × 6 com caracteres e números. Eles foram obrigados a contar silenciosamente o número de vezes que o alvo piscou e evitar movimentos desnecessários.

Fonte: Autores (2022).

4. Discussão

A tecnologia de interface cérebro-máquina pode ser implementada de várias formas, com base nisso, Wen et al(2021) realizou um revisão narrativa, com 32 artigos, comparando a reabilitação com ICM tradicional com a ICM com realidade virtual. Com o objetivo de fornecer informações mais precisas por meio de feedback para pacientes com disfunção cerebral, o autor e colaboradores mostraram que essa combinação além de promover uma terapia mais divertida, encurtou o ciclo de treinamento, haja vista que o referido sistema não precisa de muitos dispositivos externos para o processo de reabilitação, porque substitui vários ambientes desse processo ricos em experiências. Outrossim, é que pode ser utilizado em espaços curtos, o que pode aumentar a adesão dos pacientes para o protocolo de reabilitação, principalmente, para reabilitação motora.

Entretanto, alguns empecilhos se apresentam durante o uso do ICM com realidade virtual, os pacientes possuíam a dificuldade em deter uma concentração nos alvos no ambiente virtual e, além disso, o uso do sistema é instável ao longo do tempo. Essas foram as principais barreiras que reduziram a eficácia do treinamento de reabilitação. Ademais, os sinais para a captação dos comandos, advindos do eletroencefalograma são fracos e podem sofrer com interferências do meio externo, o que acaba por dificultar o processo de aquisição de informações. Todavia, mesmo com todos esses problemas técnicos, os pacientes apresentaram uma taxa média relativamente alta, em torno de 60-70%, vale ressaltar que se deve incluir o processo de neuroplasticidade, pois quando a maquinaria neuronal é submetida a novos desafios, ocorre o processo de remodelação que, por fim, propicia efeitos mais positivos.

Em comparação com a revisão realizada por Escobar e Negrete (2020), para reabilitação de acidente vascular cerebral (AVC) de membros superiores com a ICM, a possibilidade para se chegar a uma conclusão sobre a eficácia desse é não conclusiva, uma vez que o número de pacientes que receberam esse tratamento é baixo. Outro fator que dificulta a análise da eficácia é que diferentes grupos de pesquisa utilizam características de design de experimentação distintos. Sendo assim, o tipo de feedback a ser utilizado, a etiologia do acidente vascular cerebral e a duração da intervenção, são diferentes para cada estudo, o que impossibilita a formulação de um protocolo e de uma conclusão significativa para a aplicação desse método na reabilitação de pessoas com AVC. Todavia, em comparação com a não uniformidade de intervenções, os pacientes dos estudos incluídos nessa revisão apresentaram melhora substancial em áreas lesadas, com auxílio de estimulação neuromuscular logo após a intervenção com ICM e com feedback visual.

Em contrapartida, o estudo de Wang e Tsai (2022), apresenta 8 pacientes com AVC que foram submetidos a um treinamento de reabilitação com ICM. Os participantes sentavam-se em frente ao robô, e a estimulação visual era feita por meio de um computador (com frequências de 6 Hz, 7Hz, 8Hz, 9Hz e 10Hz), cada participante foi estimulado visualmente durante 5 segundos com as frequências, com a utilização do mind wave mobile 2 da Neurosky combinado com auxiliares de reabilitação de membros superiores. Logo após, testou-se o desempenho do Fast Fourier Transform (FFT) e Magnitude Squared Coherence (MSC). Ao final do estudo, mostrou-se que a frequência ideal é de 6Hz e que a FFT é cerca de 5,2%, taxa de identificação maior que o método de MSC. Os exames realizados após intervenção mostraram que a região sensorial do cérebro se tornou concentrada ativamente.

Em oposição, em um estudo mais recente, Maghsoudi e Shalbaf (2022), que teve como objetivo identificar conectividade eficazes a partir do EEG e desenvolver uma hierarquia de aprendizado para a máquina com discriminação de tarefas com imagens motoras esquerda e direita, mostrou que em 29 pacientes, tomando como base 60 ensaios, a banda de frequências (8-12Hz), beta (12-15Hz), utilizando o método de Coerência de Transferência Direta, demonstrou ser mais eficaz para sinais de EEG.

Já no estudo de Romagosa et al. (2020), onde 51 pacientes com AVC foram recrutados, estão presentes 25 sessões com ICM com imagem motora. Os participantes da pesquisa ficaram sentados, com os dois braços apoiados na mesa, usando touca

de EEG com 16 eletrodos ativos, nas posições: FC5, FC1, FC2, FC6, C5,C3,C1,CCz, C2,C4,C6,CP5,CP1, CP2 e CP6. Em sequência, foram colocados pares de almofadas de FES sobre a pele, nos extensores do punho esquerdo e direito. Todos foram instruídos a imaginar o movimento de dorsiflexão do punho de acordo com as indicações do sistema. Ao final do estudo, os pacientes mostraram um aumento significativo da função motora do braço parético, avaliada por meio da Fugl-Meyer e redução das espasticidades no punho e dedos, analisados pela Escala de Ashworth Modificada. Dessarte, os autores acreditam que a melhora funcional se deve por causa da neuroplasticidade. Outro achado importante foi com a mão saudável, melhorando a preensão.

Na revisão realizada por Luan et al (2020) propõe-se que os eletrodos intracorticais menores em tamanho, em torno de 50 a 75 mm para 15 mm, acarretam uma redução significativa ($p<0,05$) de mortes de neurônios e cicatrizes gliais em roedores. Esse achado mostra, portanto, a importância da geometria do eletrodo nas relações teciduais. No que concerne ao material utilizado, fibra de carbono tornou a escolha para eletrodos neuronais ultrapequenos, por conseguinte, reduzindo reações teciduais em reação ao corpo estranho. Todavia, as fibras de nanotubos mostram-se mais atraentes, sendo que, são mais macias e possuem menor impedância e maior injeção de carga. Esses materiais tornam o eletrodo mais flexível, quando comparado com silício e outros metais.

Contudo, ao tornar o eletrodo intracortical flexível, as forças de deformação são reduzidas, conseqüentemente, reduzindo a incompatibilidade com o tecido em contato. Na pesquisa, Luan et al. (2020), encontraram que eletrodos ultra flexíveis permitem uma densidade neuronal normal, preservação da barreira hematoencefálica e pouca resposta de proteína ácida fibrilar glial (GFAP), em torno dos eletrodos implantados, corroborando com os achados na revisão realizado por Ferguson et al(2019). Os esforços para desenvolver eletrodos de alta densidade, dita três direções que, de acordo com os autores, a primeira é redução do espaço ocupado pelo dispositivo; segundo, progresso na microfabricação de sondas neuronais de silício integradas e de alta densidade; terceira, padronizar matrizes de contato de alta densidade em substrato mais flexíveis. Outrossim, é o aprimoramento de compartilhamento de informações, isto é, a transmissão de informações de ICM sem fio, o que diminuiria o amontoado de fios, classificadas como: eletromagnéticas, magnéticas e acústicas. O Quadro 2 mostra o desenvolvimento de técnicas na ICM.

Quadro 2. Técnicas utilizadas na ICM de acordo Luan et al. (2020).

- Estimulação óptica com gravações elétricas;
 - Ultrassom: para transferência de dados;
 - Extração de recursos de potencias de campo;
- Transferência de energia sem fio magnetoelétrica(250-400kHz);
 - Sinais de radiofrequência (2,4Ghz);
- Luz vermelha visível e próxima (300-650 Thz);
 - Acoplamento indutivo de campo próximo

Fonte: Luan et al. (2020).

Araki et al. (2019) desenvolveram uma interface neuronal optogenética ,uma folha de sensor biocompatível, esticáveis e transparentes para o monitoramento de eletrocorticograma (ECoG), que se baseia em um módulo de wireless implementado com drivers de LED de 64 canais e 2 canais para a manipulação optogenética simultânea e monitoramento potenciométrico com

dimensões de: placa principal (75mm x 40 mm x 12mm e com massa de 33,53g); placa conversora A/D (25mm x 20 mm x 2,5mm e com massa de 0,98g). Possuíam, então, o tamanho adequado para serem testados em animais e, desse modo, compararam o eletrocorticograma, o sistema eletrofisiológico tradicional, com o sistema desenvolvida pela equipe pesquisadora. Os dois eletrodos foram colocados próximo um do outro, de 200 micrometros, no córtex somatossensorial. Em suma, o registro do ECoG realizado pela interface da equipe de pesquisa foi similar ao do modo tradicional. Isso demonstra a transmissão sem fio da equipe, sendo pequeno e leve, pode ser utilizado para uma interface neuronal e para diagnósticos de doenças neurológicas.

Cheng, et al., (2017) com objetivo de melhorar o desempenho da ICM baseado em P300, que é um dos sistemas mais usados para obter alta precisão de classificação na taxa de transferência de informações, utilizaram o método de efeito do padrão facial semitransparente (STF-P), em comparação com o método tradicional de padrão facial, onde o sujeito não conseguia ver o caracteres alvo quando os estímulos eram exibidos. Os resultados foram significativos para o método de STF-P, $p < 0,05$, em relação ao método tradicional. Dessa forma, esses achados podem facilitar a comunicação entre máquina e cérebro em pacientes e facilitar o controle de robôs apenas com o comando do sistema nervoso. Além disso, durante o estudo, perceberam que um contraste de alta luminosidade pode originar estímulos infrequentes e perceptíveis; em vista disso, os pacientes podem concentrar-se melhor e identificar, com eficiência, os personagens alvo na tela do computador.

Em relação ao córtex motor, Stavisky et al (2017)., e Hu et al(2018)., ao analisarem estudos com macacos, objetivando investigar como o córtex motor previne mudanças prematuras para alvos e após isso corrigir o movimento e executar de forma apropriada, demonstraram aspectos importante quanto à ICM, que são: durante a atividade inicial relacionada ao feedback é interrompida na leitura do córtex motor; a ICM identifica a atividade de saída nula e de saída potente; o subespaço de saída nula a atividade precoce a evitar movimentos prematuros e a informação de saída é corrigida posteriormente com as dimensões de potência de saída. Essas conclusões iniciais permitem que a ICM, possa corrigir futuramente perturbações evocadas e os sinais otimizados para planejar a execução do movimento durante o alcance natural que podem ser transmitidas para o exoesqueleto, por conseguinte, tornando o equipamento mais seguro ao ser utilizado na sociedade.

Em face disso, e contribuindo com os achados de Luan et al. (2020), uma cadeira de rodas inteligente comanda pelo cérebro foi desenvolvida. A cadeira era composta de um braço robótico leve com cinco graus de liberdade, câmera Kinect, lidar de baixo custo, rodas omnidirecionais, módulo de reconhecimento de alvo e controle automático. O sistema utilizado foi o P300 associado ao algoritmo (YOLO), sistema operacional ROS. Além disso, a utilização de eletromiografia é empregada como fonte inicial para iniciar os comandos de validação. O paciente foi ordenado a seguir instruções como, por exemplo, “passar pela porta”. A conclusão do estudo é que esse aparelho oferece serviços eficientes para os usuários e que poderá ser empregado em processos de reabilitação e mais aquisição de independência. (Tang et al., 2018).

O processo inflamatório causado pelo eletrodos intracorticais, relacionados ao corpo estranho que inicia o mecanismo de cascata de neuroinflamatórias autopertuantes, tiveram o papel de promover a diminuição do desempenho do registro. Hermann e Capadona(2019). Em sua pesquisa, Serruya et al. (2017) desenvolveu um eletrodo intracortical com tecnologia biohíbrida, para combater esses processos inflamatórios provocados pelos eletrodos convencionais, com neurônios vivos e utilização de biomateriais e tecnologia óptica, com o intuito de usar como base biológica para sonar e modular o sistema nervoso. Para isso, microtecidos são empregados em “eletrodos vivos” baseados em axônio, formado por microestruturas colunares compostas por neurônios que lançam tratos axonais longos para dentro do lúmen em um hidrogel o qual é projetado para a entrega de chaperonas no cérebro. O procedimento é realizado com microinjeções, após isso, o segmento axonal adentra até a profundidade onde a sinapse dos neurônios dos hospedeiros.

Todavia, não se sabe ainda sobre a sua eficácia, pois a utilização dessa interface biohíbrida, de neurônios dopaminérgicos do mesencéfalo ventral e da eminência ganglionar medial, se apresenta ainda em estágios de desenvolvimento, haja vista que ainda pode induzir o processo inflamatório ou a rejeição do enxerto. Apesar disso, o processo inflamatório de

microelétrodos convencionais em comparação com os bioeletrodos, essa resposta imune, parece ser bem tolerado. A priori, as células troncos podem ser empregadas nesse método, sendo assim, podendo ser geneticamente modificados para que não haja rejeição e outros problemas imunes. (Serruya et al., 2017).

Em pacientes epiléticos Loza et al. (2019), usaram um protocolo, em 6 indivíduos, com 32 eletrodos implantados no córtex frontal, comportando uma frequência de banda gama alta (85-145 Hz) e o uso de algoritmo para a ECoG. Esse protocolo foi utilizado com o objetivo de codificar a partir do princípio Minimum Description Length (MDI). Mostrou ser não apenas interpretáveis, mas também discriminantes em um espaço dimensional inferior. Essa abordagem pode ser utilizada para que informações mais sofisticadas e apuradas podem ser usadas em exoesqueletos. Dessa forma, ela pode favorecer pacientes tetraplégicos ou pelo menos aumentar a sensibilidade parcialmente. (Schuh et al., 2013).

Para a aplicação em exoesqueleto Barria et al. (2021) aplicou em tornozelo controlado por ICM associado a estímulos visuais e hápticos para facilitar o surgimento de imagens motoras e com isso controlar o exoesqueleto do tornozelo T-FLEX, em 5 pacientes pós AVC. Em contrapartida com os outros estudos, os autores não acharam melhora significativa no hemisfério lesado, em vista disso, os pesquisadores aconselharam realizar novos experimentos com uma amostra maior e um logaritmo mais especializado.

Nesta revisão, um caso clínico foi incluído por se tratar de um paciente amputado, que utilizou a ICM com feedback somatossensorial artificial, que foi combinada com outras informações sensoriais naturais. O amputado utilizou uma prótese bidirecional. O controle de abertura e fechamento dava-se por meio de eletromiografia de superfície, que recebeu estimulação intraneural de acordo o tamanho do objeto no nervo ulnar ao fechar a mão robótica. Incrivelmente, a estimulação intraneuronal resultou em sensação de vibração na mão fantasma, que em oposição, substituiu o feedback háptico ausente. Esse avanço, segundo os autores, possibilita processos de integração multimodal. (Risso et al., 2019).

Em consonância com Risso et al. (2019) e Twardowski et al (2018) desenvolveram uma unidade motora (MU Drive), não invisível, que utiliza algoritmos da ICM em tempo real para processar os disparos da unidade motora através de sinais eletromiográficos de superfície, os quais registraram músculos residuais de um membro amputado ou congênito ausente. Em sequência, esses disparos são analisados e transformados em sinais biomecânicos, responsáveis por gerarem uma fonte de controle para realizar o movimento do membro protético. Assim, o MU Drive, com base nos autores, fornece uma melhor precisão de processamento, mais responsivo com suavidade e fiel ao movimento pretendido. Nesse contexto, essa tecnologia poderia ser empregada em exoesqueletos, dispositivos assistivos e outras aplicações com fins industriais.

Para saber qual a modalidade de feedback aferente é mais relevante ou a combinação, Jochumsen et al (2018) propuseram três sessões experimentais com 12 participantes saudáveis. Foi solicitado que eles imaginassem uma dorsiflexão que foi decodificada por um ICM que em seguida ativou o feedback aferente: 1-nervo peroneal;2- movimento passivo;3- estimulação elétrica combinada e movimento passivo. A estimulação magnética transcraniana foi utilizada para avaliar a excitabilidade cortical. Com o dado de ($p < 0,05$), a três intervenções mostraram-se significativas estatisticamente. Esses diferentes tipos de feedback podem ser utilizados baseado no paciente, e chegaram à conclusão que o tempo de imagens de movimento e feedback aferente é o principal fator da indução da plasticidade cortical e, além disso, concluiu que o tipo específico de feedback tem um peso moderado. Sendo assim, combinada com a ICM, podem ser utilizadas em práticas clínicas com transferência de intervenções habilidades.

5. Conclusões

A partir do que foi discutido, é possível concluir que com os atuais avanços na interface cérebro-máquina e o avanço da tecnologia moderna, as possibilidades de aplicações são inúmeras, especialmente, em reabilitação de pessoas com lesões na

medula espinhal e com doenças neurodegenerativas, podendo, desse modo, possibilitar uma maior independência funcional, com recuperação parcial do movimento e sensibilidade somatossensorial. As técnicas em desenvolvimento, no entanto, ainda estão longe de serem empregadas em larga escala nos centros de reabilitação e nas atividades diárias. Próteses robóticas já são uma realidade no meio contemporâneo, fato responsável por mostrar o grande potencial que o avanço desse conhecimento pode contribuir para a evolução da sociedade como um todo e a integração de pessoas com deficiências, que também pode ser empregada em indústria de produção de bens de consumo, por exemplo, automóveis comandados por comandos cerebrais a longa distância.

Verificou-se a aplicação de protocolos e métodos diferentes, o que pode ser um empecilho para a replicação de futuros estudos e um número baixo de aquisição nessa modalidade de terapia. Não obstante, o desenvolvimento de eletrodos biocompatíveis a partir de prolongamentos de axônios, que podem diminuir o processo inflamatório em implantes intracorticais, o aprimoramento de codificação e decodificação de métodos não invasivos acoplados em diferentes partes do corpo. Assim sendo, os autores deste mostram alguns dos últimos avanços para que a comunidade científica possa investir mais nessa área com o apoio de investimentos governamentais. Ademais, os autores sugerem para as futuras pesquisas que uma amostra maior seja estabelecida, além da etiologia da neuropatologia dos pacientes possuírem um padrão dentro dos limites do grau de severidade e disfunção, para que possa determinar estatisticamente a terapia ICM.

Referências

- Araki, T., Uemura, T., Yoshimoto, S., Takemoto, A., Noda, Y., Izumi, S., & Sekitani, T. (2019). Wireless Monitoring Using a Stretchable and Transparent Sensor Sheet Containing Metal Nanowires. *Adv Mater*, 32(15):e1902684. [10.1002/adma.201902684](https://doi.org/10.1002/adma.201902684).
- Barria, P., Pino, A., Tovar, N., Gomez-Vargas, D., Baleta, K., Díaz, C. A. R., Múnera, M., & Cifuentes, C. A. (2021). BCI-Based Control for Ankle Exoskeleton T-FLEX: Comparison of Visual and Haptic Stimuli with Stroke Survivors. *Sensors (Basel)*, 21(19):6431. [10.3390/s21196431](https://doi.org/10.3390/s21196431)
- Carino-Escobar, R. I., & Cantillo-Negrete, J. (2020). Interfaces cérebro-computador para reabilitação motora de membros superiores de pacientes com acidente vascular cerebral. *Revista mexicana de engenharia biomédica*, 41 (1), 128-140. <https://doi.org/10.17488/rmib.41.1.10>
- Cheng, J., Jin, J., & Wang, X. (2017). Comparison of the BCI Performance between the Semitransparent Face Pattern and the Traditional Face Pattern. *Comput Intell Neurosci*, 1323985. [10.1155/2017/1323985](https://doi.org/10.1155/2017/1323985).
- da Silva Pinto, M. A. (2011a). Estudo do potencial evocado visual em regime permanente baseado em LED para interface cérebro máquina. publicado no site da Universidade Federal de Minas Gerais. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8R3HN7>
- de Melo, G. C. (2018). Algoritmos para reconhecimento de padrões em imagética motora em uma interface cérebro-máquina. publicado no site da Puc-Rio. <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/projetosEspeciais/ETDs/consultas/conteudo.php?strSecao=resultado&nrSeq=34769@1>
- de Souza, J. R. M., de Aquino Wanderley, D., & da Silva Dória, Á. (2015). A importância da robótica aplicada à neurociência como ferramenta utilizada na reabilitação de pacientes com deficiências locomotoras: uma revisão teórica. *Ciências da Engenharia*, 3 (1), 61. <https://sustenera.co/index.php/engineeringsciences/article/view/SPC2318-3055.2015.001.0001>
- Hermann, J. K., & Capadona J. R. (2019) Understanding the Role of Innate Immunity in the Response to Intracortical Microelectrodes. *Crit Rev Biomed Eng*, 46(4):341-367. doi: [10.1615/CritRevBiomedEng.2018027166](https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2018027166).
- Hu, K., Jamali, M., Moses, Z. B., Ortega, C. A., Friedman, G. N., Xu, W., & Williams, Z. M. (2018). Decoding unconstrained arm movements in primates using high-density electrocorticography signals for brain-machine interface use. *Sci Rep*, 8(1):10583. doi: [10.1038/s41598-018-28940-7](https://doi.org/10.1038/s41598-018-28940-7).
- Jochumsen, M., Cremoux, S., Robinaut, L., Lauber, J., Arceo, J. C., Navid, M. S., Nedergaard, R. W., Rashid, U., Haavik, H., & Niazi, I. K. (2018). Investigation of Optimal Afferent Feedback Modality for Inducing Neural Plasticity with A Self-Paced Brain-Computer Interface. *Sensors (Basel)*, 8(11):3761. [10.3390/s18113761](https://doi.org/10.3390/s18113761).
- Kellmeyer, P., Grosse-Wentrup, M., Schulze-Bonhage, A., Ziemann, U., & Ball, T. (2018). Electrophysiological correlates of neurodegeneration in motor and non-motor brain regions in amyotrophic lateral sclerosis—implications for brain-computer interfacing. *Journal of Neural Engineering*, 15(4). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2552/aabfa5>
- Loza, C. A., Reddy, C. G., Akella, S., & Príncipe, J. C. (2019). Discrimination of Movement-Related Cortical Potentials Exploiting Unsupervised Learned Representations From ECoGs. *Front Neurosci*, 13:1248. [10.3389/fnins.2019.01248](https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01248).
- Luan, L., Robinson, J. T., Aazhang, B., Chi, T., Yang, K., Li, X., Rathore, H., Singer, A., Yellapantula, S., Fan, Y., Yu, Z., & Xie, C. (2020). Recent Advances in Electrical Neural Interface Engineering: Minimal Invasiveness, Longevity, and Scalability. *Neuron*, 108(2):302-321. [10.1016/j.neuron.2020.10.011](https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.10.011).
- Maghsoudi, A., & Shalhaf, A. (2022). Hand Motor Imagery Classification Using Effective Connectivity and Hierarchical Machine Learning in EEG Signals. *J Biomed Phys Eng*, 2(2):161-170. [10.31661/jbpe.v0i0.1264](https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.1264).

- R. Schuh Ânderson, Lima A., de O. Heidrich, R., Mossmann, J., Flores, C., R. Bez, M. (2013) Desenvolvimento de Um Simulador Controlado por Interface Cérebro- Computador Não Invasiva para Treinamento na Utilização de Cadeira de Rodas. *RENOTE*, 11(3). <https://www.seer.ufrgs.br/index.php/renote/article/view/44716>
- Risso, G., Valle, G., Iberite, F., Strauss, I., Stieglitz, T., Controzzi, M., Clemente, F., Granata, G., Rossini, P. M., Micera, S., & Baud-Bovy, G. (2019) Optimal integration of intraneural somatosensory feedback with visual information: a single-case study. *Sci Rep*, 9(1):7916. 10.1038/s41598-019-43815-1
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática X revisão narrativa. *Scielo*, 20(2). <https://www.scielo.br/j/ape/a/z7zZ4Z4GwYV6FR7S9FHTByr/#>
- Schuh, Â. R., Lima, A., de O. Heidrich, R., Mossmann, J., Flores, C., & Bez, M. R. (2013). Desenvolvimento de Um Simulador Controlado por Interface Cérebro- Computador Não Invasiva para Treinamento na Utilização de Cadeira de Rodas. *RENOTE*, 11(3), 1–9. <https://seer.ufrgs.br/index.php/renote/article/view/44716>
- Sebastián-Romagosa M., Cho, W., Ortner, R., Murovec, N., Von Oertzen, T., Kamada, K., Allison, B. Z., & Guger, C. (2020) Brain Computer Interface Treatment for Motor Rehabilitation of Upper Extremity of Stroke Patients-A Feasibility Study. *Front Neurosci*, 14:591435. 10.3389/fnins.2020.591435
- Serruya, M. D., Harris, J. P., Adewole, D. O., Struzyna, L. A., Burrell, J. C., Nemes, A., Petrov, D., Kraft, R. H., Chen, H. I., Wolf, J. A., & Cullen, D. K. (2017) Engineered Axonal Tracts as "Living Electrodes" for Synaptic-Based Modulation of Neural Circuitry. *Adv Funct Mater*. 28(12):1701183. 10.1002/adfm.201701183.
- Souza, J. P. G., Krizan, J., Costa, G. de M., & Feroseli, A. F. de O. (2015). Interface cérebro – máquina (icm): da transdução do estímulo externo em impulso nervoso a tradução em comandos digitais. *Caderno De Graduação - Ciências Biológicas E Da Saúde - UNIT*, 3(1), 139–152. <https://periodicos.set.edu.br/fitsbiosauade/article/view/2634>
- Stavisky, S. D., Kao, J. C., Ryu, S. I., & Shenoy, K. V. (2017). Motor Cortical Visuomotor Feedback Activity Is Initially Isolated from Downstream Targets in Output-Null Neural State Space Dimensions. *Neuron*, 95(1):195-208.e9. 10.1016/j.neuron.2017.05.023.
- Tang, J., Liu, Y., Hu, D., & Zhou, Z. (2018). Towards BCI-actuated smart wheelchair system. *Biomed Eng Online*, 17(1):111. 10.1186/s12938-018-0545-x
- Twardowski, M. D., Roy, S. H., Li, Z., Contessa, P., De Luca, G., & Kline, J. C. (2018). Motor unit drive: a neural interface for real-time upper limb prosthetic control. *J Neural Eng*, 6(1):016012. 10.1088/1741-2552/aab0f.
- Wang, C. H., & Tsai, K. Y. (2022). Optimization of machine learning method combined with brain-computer interface rehabilitation system. *J Phys Ther Sci*, 34(5):379-385. 10.1589/jpts.34.379
- Wen, D., Fan, Y., Hsu, S. H., Xu, J., Zhou, Y., Tao, J., Lan, X., & Li, F. (2021). Combining brain-computer interface and virtual reality for rehabilitation in neurological diseases: A narrative review. *Ann Phys Rehabil Med*. 2021 Jan;64(1):101404