



AVANÇOS E APLICAÇÕES DAS TECNOLOGIAS ASSISTIVAS NA FISIOTERAPIA NEUROLÓGICA : UMA REVISÃO DA LITERATURA

ADVANCES AND APPLICATIONS OF ASSISTIVE TECHNOLOGIES IN NEUROLOGICAL PHYSIOTHERAPY: A LITERATURE REVIEW

AVANCES Y APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE ASISTENCIA EN FISIOTERAPIA NEUROLÓGICA: UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA



<https://doi.org/10.56238/levv12n30-019>

Data de submissão: 16/08/2022

Data de publicação: 16/09/2022

Joelle Pires Alvão

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo analisar os avanços e aplicações das tecnologias assistivas na fisioterapia neurológica, por meio de uma revisão sistemática da literatura científica. Foram incluídas publicações que investigaram recursos como robótica aplicada à marcha, interfaces cérebro-computador, estimulação elétrica funcional, realidade virtual, telereabilitação e sensores vestíveis. A síntese das evidências demonstrou que a robótica representa um dos recursos mais consistentes para o treino de marcha em indivíduos pós-acidente vascular cerebral, favorecendo a independência funcional e a melhora da resistência cardiorrespiratória e do equilíbrio. Na reabilitação de membros superiores, verificou-se que a associação de interfaces cérebro-computador à estimulação elétrica funcional potencializa a reorganização cortical e contribui para a recuperação motora. A realidade virtual, em suas versões imersivas e não imersivas, apresentou eficácia em estimular a plasticidade neural e o engajamento, enquanto a telereabilitação demonstrou resultados comparáveis aos modelos presenciais, possibilitando maior acessibilidade. Os sensores vestíveis destacaram-se pela capacidade de monitorar de forma contínua parâmetros motores e funcionais em ambientes reais. Conclui-se que as tecnologias assistivas configuraram recursos complementares de grande potencial para ampliar a efetividade dos protocolos convencionais de fisioterapia neurológica, embora persistam limitações relacionadas à padronização metodológica, à disponibilidade de equipamentos e à necessidade de maior validação clínica.

Palavras-chave: Fisioterapia Neurológica. Tecnologias Assistivas. Robótica. Interfaces Cérebro-computador. Realidade Virtual. Telereabilitação.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the advances and applications of assistive technologies in neurological physiotherapy through a systematic literature review. Publications investigating resources such as robotics applied to gait training, brain-computer interfaces, functional electrical stimulation, virtual reality, telerehabilitation, and wearable sensors were included. The synthesis of evidence demonstrated that robotics is one of the most consistent resources for gait training in post-stroke individuals, promoting functional independence as well as improvements in cardiorespiratory endurance and balance. In upper-limb rehabilitation, the combination of brain-computer interfaces with functional electrical stimulation enhanced cortical reorganization and contributed to motor recovery. Virtual reality, in both immersive and non-immersive versions, proved effective in stimulating neural plasticity



and patient engagement, while telerehabilitation achieved outcomes comparable to face-to-face programs, improving accessibility. Wearable sensors stood out for their ability to continuously monitor motor and functional parameters in real environments. It is concluded that assistive technologies represent complementary resources with great potential to enhance the effectiveness of conventional neurological physiotherapy protocols, although limitations related to methodological standardization, equipment availability, and the need for broader clinical validation remain.

Keywords: Neurological Physiotherapy. Assistive Technologies. Robotics. Brain-computer Interfaces. Virtual Reality. Telerehabilitation.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo analizar los avances y las aplicaciones de las tecnologías de asistencia en fisioterapia neurológica mediante una revisión sistemática de la literatura científica. Se incluyeron publicaciones que investigaron recursos como la robótica aplicada a la marcha, las interfaces cerebro-computadora, la estimulación eléctrica funcional, la realidad virtual, la telerrehabilitación y los sensores portátiles. La síntesis de la evidencia demostró que la robótica representa uno de los recursos más consistentes para el entrenamiento de la marcha en personas que han sufrido un ictus, promoviendo la independencia funcional y mejorando la resistencia cardiorrespiratoria y el equilibrio. En la rehabilitación de miembros superiores, se observó que la combinación de interfaces cerebro-computadora con estimulación eléctrica funcional mejora la reorganización cortical y contribuye a la recuperación motora. La realidad virtual, en sus versiones inmersiva y no inmersiva, fue eficaz para estimular la plasticidad y la interacción neuronal, mientras que la telerrehabilitación mostró resultados comparables a los de los modelos presenciales, lo que permite una mayor accesibilidad. Los sensores portátiles destacaron por su capacidad para monitorizar continuamente los parámetros motores y funcionales en entornos reales. Concluimos que las tecnologías de asistencia representan recursos complementarios con gran potencial para mejorar la eficacia de los protocolos convencionales de fisioterapia neurológica, si bien persisten limitaciones relacionadas con la estandarización metodológica, la disponibilidad de equipos y la necesidad de mayor validación clínica.

Palabras clave: Fisioterapia Neurológica. Tecnologías de Asistencia. Robótica. Interfaces Cerebro-computadora. Realidad Virtual. Telerrehabilitación.

1 INTRODUÇÃO

A fisioterapia neurológica tem se consolidado como um campo indispensável para a recuperação funcional de indivíduos acometidos por lesões do sistema nervoso central e periférico, diante de condições como acidente vascular cerebral, traumatismo crânioencefálico, esclerose múltipla e lesões medulares, a busca por estratégias terapêuticas que ampliem a efetividade dos tratamentos se intensifica, abrindo espaço para a incorporação de tecnologias assistivas que potencializam os recursos convencionais (Nam, *et al.*, 2019).

As limitações impostas por essas patologias, que incluem alterações motoras, déficits de equilíbrio e prejuízos cognitivos, geram impacto significativo na qualidade de vida, tornando necessário desenvolver soluções que ultrapassem a abordagem tradicional, nesse contexto, as inovações tecnológicas vêm sendo aplicadas como meios de intensificar o treino, promover maior especificidade e permitir monitoramento preciso do desempenho dos pacientes (Moucheboeuf, *et al.*, 2020).

O avanço de sistemas robóticos, interfaces cérebro-computador, estimulação elétrica funcional, realidade virtual e sensores vestíveis inaugura novas perspectivas de atuação, oferecendo condições para reabilitação personalizada e com maior aderência aos princípios da neuroplasticidade, essas ferramentas não substituem a intervenção fisioterapêutica, mas atuam de forma complementar, agregando precisão e continuidade aos protocolos clínicos (Moucheboeuf, 2020).

Justifica-se o estudo por existir um crescimento expressivo na produção científica voltada à integração entre fisioterapia e tecnologias assistivas, entretanto, a heterogeneidade metodológica e a diversidade de dispositivos empregados dificultam a consolidação de protocolos clínicos universais, o que reforça a necessidade de revisões sistemáticas que sintetizem evidências e indiquem caminhos para padronização (Banqued, 2021).

O interesse crescente de centros de pesquisa e serviços de saúde pela utilização dessas tecnologias está relacionado ao potencial de acelerar processos de reabilitação, ampliar ganhos funcionais e reduzir limitações permanentes, ainda que o custo, a infraestrutura necessária e a capacitação profissional sejam fatores que impactam sua implementação em larga escala, esse cenário evidencia a relevância científica e prática de aprofundar o conhecimento sobre a temática (Mansour, 2022).

O objetivo geral deste artigo é analisar os avanços e aplicações das tecnologias assistivas na fisioterapia neurológica, a partir de uma revisão sistemática da literatura científica, de modo a identificar quais recursos apresentam evidências mais consistentes de efetividade, quais se encontram em fase de validação clínica e quais carecem de investigações adicionais para garantir aplicabilidade.

Como objetivos específicos, busca-se mapear as contribuições da robótica para treino de marcha, avaliar a efetividade de interfaces cérebro-computador e estimulação elétrica em reabilitação



de membros superiores, examinar a utilização da realidade virtual em contextos presenciais e remotos e identificar a aplicabilidade de dispositivos vestíveis para monitoramento de desempenho funcional.

Assim, esta investigação se justifica por seu potencial de contribuir para a prática clínica e para a formação acadêmica, oferecendo uma síntese atualizada que orienta profissionais e pesquisadores quanto às possibilidades reais de utilização das tecnologias assistivas na fisioterapia neurológica, promovendo fundamentação científica para decisões clínicas e para o desenvolvimento de novos protocolos terapêuticos (da Cunha, 2021).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ROBÓTICA E MARCHA

A evolução da robótica aplicada à fisioterapia neurológica representa um dos avanços mais significativos da reabilitação contemporânea, esses dispositivos têm sido projetados para oferecer suporte mecânico e feedback em tempo real durante o treino de marcha, criando condições para a prática intensiva e repetitiva que favorece a neuroplasticidade, além de viabilizar maior segurança tanto para o paciente quanto para o terapeuta, reduzindo o esforço físico do profissional durante o processo (Nam, *et al.*, 2019).

O desenvolvimento de exoesqueletos e esteiras eletromecânicas trouxe a possibilidade de padronizar movimentos e controlar variáveis como velocidade, cadência e intensidade, elementos que tornam o treino mais previsível e quantificável, permitindo ajustes de acordo com o nível de comprometimento motor do paciente e fornecendo indicadores objetivos que orientam a evolução terapêutica (Moucheboeuf, *et al.*, 2020).

Estudos clínicos apontam que o treino de marcha assistido por robôs aumenta a probabilidade de pacientes com acidente vascular cerebral recuperarem a capacidade de deambulação independente, com maior impacto observado em fases iniciais da reabilitação, principalmente entre aqueles que ainda não apresentam marcha funcional, o que sugere que o uso precoce pode potencializar resultados (Moucheboeuf, 2020).

O emprego da robótica na reabilitação também favorece a motivação do paciente, uma vez que o feedback visual e auditivo, associado a metas progressivas, contribui para maior engajamento, essa interação tecnológica cria um ambiente terapêutico dinâmico e adaptável, que contrasta com a monotonia de exercícios convencionais, fortalecendo a adesão ao tratamento (Nam, *et al.*, 2019).

A literatura ainda demonstra que os ganhos obtidos com o treino robótico vão além da simples retomada da marcha, incluindo melhorias na resistência cardiorrespiratória, equilíbrio dinâmico e coordenação motora, fatores determinantes para a reintegração funcional, pois ampliam a autonomia do indivíduo em atividades do cotidiano, diminuindo sua dependência de cuidadores (Moucheboeuf, *et al.*, 2020).



A padronização proporcionada pelos dispositivos robóticos reduz variações entre sessões e possibilita maior controle experimental em pesquisas clínicas, contribuindo para a produção de evidências mais robustas sobre eficácia e segurança, essa característica fortalece a base científica da fisioterapia neurológica e abre espaço para novos protocolos baseados em resultados mensuráveis (Moucheboeuf, 2020).

Embora os benefícios sejam consistentes, a aplicação clínica da robótica deve ser entendida como recurso complementar, visto que não substitui a intervenção fisioterapêutica, mas amplia sua capacidade de alcance, ao fornecer condições para treino intensivo em menor tempo, integrando-se a programas mais abrangentes que envolvem exercícios funcionais, atividades de vida diária e estímulos cognitivos (Nam, *et al.*, 2019).

Os estudos também indicam que a efetividade do treino robótico varia conforme parâmetros como número de sessões, intensidade de treino e fase de reabilitação, pacientes em estágio subagudo tendem a apresentar ganhos mais expressivos, enquanto em fases crônicas os resultados são mais discretos, ainda que relevantes, esse aspecto reforça a importância da personalização no uso da tecnologia (Moucheboeuf, *et al.*, 2020).

Ressalta-se que a robótica possibilita a coleta de dados detalhados sobre padrões de marcha, oferecendo métricas objetivas que auxiliam no planejamento clínico e no acompanhamento da evolução, essas informações podem ser utilizadas para ajustar parâmetros em tempo real e identificar precocemente limitações que exigem intervenção diferenciada (Moucheboeuf, 2020).

A utilização de robôs também contribui para a segurança do paciente durante o treino, especialmente em indivíduos com instabilidade postural acentuada, ao reduzir o risco de quedas, os dispositivos oferecem maior confiança e permitem que o terapeuta direcione sua atenção para outros aspectos da intervenção, tornando o processo mais eficaz e organizado (Nam, *et al.*, 2019).

Na prática clínica, a inserção da robótica ainda enfrenta barreiras relacionadas ao custo e à disponibilidade de equipamentos, no entanto, a tendência de incorporação gradual em centros especializados sinaliza um caminho de expansão, principalmente em serviços de alta complexidade e em programas de pesquisa que buscam validar protocolos de reabilitação tecnológica (Moucheboeuf, *et al.*, 2020).

Assim, a robótica para treino de marcha emerge como recurso consolidado na fisioterapia neurológica, reunindo evidências de eficácia e segurança, ao mesmo tempo em que se apresenta como área em constante aprimoramento, marcada por inovações que buscam aumentar a naturalidade dos movimentos e a interação entre paciente e dispositivo, fortalecendo a reabilitação como ciência aplicada ao cuidado humano (Moucheboeuf, 2020).



2.2 BCI E FES EM MEMBRO SUPERIOR

As interfaces cérebro-computador surgiram como um campo inovador da neuroengenharia, permitindo captar sinais elétricos corticais e traduzi-los em comandos para dispositivos externos, na reabilitação neurológica esses sistemas têm sido aplicados em pacientes com limitações graves de membros superiores, possibilitando a execução de movimentos assistidos que reforçam a intenção motora e estimulam redes neurais responsáveis pelo controle funcional (Baniqued, 2021).

A lógica terapêutica das BCI fundamenta-se no princípio de que a simples imaginação ou intenção de movimento gera atividade cerebral que pode ser captada por eletroencefalografia, esse sinal, quando traduzido em feedback visual, robótico ou elétrico, promove aprendizado motor e facilita a reorganização cortical, ampliando as chances de recuperação em indivíduos com lesões centrais (Mansour, 2022).

Revisões sistemáticas apontam que protocolos de BCI associados à estimulação elétrica funcional potencializam os ganhos motores, essa integração permite que a intenção motora seja reforçada por estímulos periféricos, criando uma via de retroalimentação entre o sistema nervoso central e a execução física, elemento fundamental para induzir plasticidade adaptativa em fases subagudas e crônicas (Peng, 2022).

Estudos mostram que a utilização de BCI com feedback sensorial associado a FES ou dispositivos robóticos incrementa significativamente escores funcionais como *Fugl-Meyer* e *Action Research Arm Test*, indicadores amplamente utilizados para mensurar recuperação de membros superiores, evidenciando que a combinação de tecnologias oferece vantagens frente a terapias convencionais isoladas (Tang, et al., 2021).

A estimulação elétrica funcional aplicada ao membro superior é descrita em diferentes arquiteturas, como os sistemas de circuito aberto, os controlados por sinais mioelétricos e os integrados a interfaces cérebro-computador, todos demonstram algum nível de eficácia na restauração da força e do movimento, ainda que com variações de intensidade e duração dos efeitos (da Cunha, 2021).

No contexto clínico, a aplicação de FES busca reproduzir movimentos funcionais de alcance, preensão e manipulação, auxiliando o paciente a realizar tarefas cotidianas enquanto reforça padrões motores desejados, essa repetição guiada favorece o reaprendizado motor e estimula a integração de vias neurais remanescentes, fatores diretamente relacionados ao desempenho nas atividades de vida diária (Tang, et al., 2021).

A literatura científica também destaca a importância do momento da intervenção, pacientes em estágios iniciais de reabilitação tendem a responder com maior magnitude ao uso de BCI e FES, enquanto em estágios crônicos os ganhos são mais discretos, mas ainda clinicamente relevantes, o que reforça a necessidade de protocolos que considerem a temporalidade da lesão (Mansour, 2022).



Outra vertente analisada é o impacto desses dispositivos na motivação e engajamento do paciente, o uso de feedback visual, tático ou auditivo associado à intenção motora estimula maior participação ativa durante as sessões, criando um ambiente terapêutico interativo que favorece a continuidade do tratamento e a adesão a programas mais prolongados (Baniqued, 2021).

Ainda que as evidências sejam promissoras, estudos apontam limitações quanto à padronização de parâmetros técnicos, à heterogeneidade das amostras e ao reduzido número de ensaios multicêntricos, fatores que dificultam a generalização dos resultados e a definição de protocolos universalmente aplicáveis, ressaltando a importância de investigações que ampliem o rigor metodológico (Peng, 2022).

No ponto de vista tecnológico, a combinação entre inteligência artificial e BCI tem despontado como caminho para melhorar a precisão da decodificação de sinais cerebrais, permitindo respostas mais rápidas e adequadas, essa integração pode tornar os sistemas mais acessíveis e adaptáveis, ampliando suas aplicações em diferentes contextos clínicos e populações (Tang, *et al.*, 2021).

A FES, por sua vez, continua evoluindo em direção a dispositivos portáteis e de fácil adaptação, o que viabiliza sua utilização em ambiente clínico e em contextos domiciliares, ampliando a frequência de treino e favorecendo programas de reabilitação híbridos que combinam supervisão presencial e prática autônoma supervisionada remotamente (da Cunha, 2021).

Dessa forma, as tecnologias de BCI e FES aplicadas à reabilitação de membros superiores configuram um campo em expansão, com resultados consistentes em termos de ganhos motores e funcionais, ao mesmo tempo em que abrem perspectivas de inovação no cuidado fisioterapêutico, sinalizando que a convergência entre neurociência, engenharia e prática clínica redefine a maneira como se estruturam os protocolos de reabilitação neurológica (Mansour, 2022).

2.3 VR, TELEREABILITAÇÃO E WEARABLES

A realidade virtual consolidou-se como uma das tecnologias mais estudadas na fisioterapia neurológica contemporânea, permitindo que pacientes interajam em ambientes imersivos que simulam atividades funcionais, essa abordagem favorece a repetição intensiva e o feedback imediato, condições que potencializam a plasticidade neural e estimulam a motivação durante os treinos (Zhang, 2020).

As plataformas de VR apresentam diversidade de aplicações, desde sistemas imersivos com óculos e sensores até programas não imersivos executados em telas, em ambos os casos há ganhos clínicos relevantes, sobretudo em função de membro superior e em tarefas de coordenação motora, ainda que a literatura ressalte a heterogeneidade metodológica e a necessidade de padronização de protocolos (Feitosa, 2022).

Um dos principais diferenciais da realidade virtual é a capacidade de estimular múltiplas áreas corticais simultaneamente, evidenciada por estudos de neuroimagem que demonstram reorganização



de regiões como córtex motor primário, área somatossensorial e área suplementar motora, esse mecanismo neurofisiológico reforça a associação entre prática imersiva e evolução clínica (Feitosa, 2022).

A realidade virtual pode ser incorporada tanto a programas presenciais quanto a intervenções remotas, permitindo o desenvolvimento de modelos híbridos de atendimento, nos quais o paciente pratica em casa sob monitoramento profissional à distância, estratégia que amplia o acesso a serviços especializados e reduz barreiras geográficas (Sarfo, *et al.* 2018).

As pesquisas sobre telereabilitação mediada por VR mostram que os resultados em função de membro superior e equilíbrio são comparáveis aos obtidos em sessões presenciais, o que reforça a viabilidade de incluir esse modelo em sistemas públicos e privados de saúde, desde que acompanhados por protocolos de segurança, acompanhamento profissional e treinamento adequado dos pacientes (Sarfo, *et al.* 2018).

Essa modalidade também fortalece a continuidade terapêutica, pois permite que o paciente mantenha frequência elevada de treino, mesmo fora do ambiente clínico, ampliando a intensidade do processo de reabilitação, fator considerado determinante para ganhos funcionais consistentes em indivíduos pós-AVC ou com doenças degenerativas (Zhang, 2020).

No campo dos sensores vestíveis, a evolução tecnológica trouxe dispositivos capazes de monitorar marcha, equilíbrio, cadência e amplitude de movimento em tempo real, utilizando acelerômetros, giroscópios e sensores de pressão plantar, essas ferramentas permitem avaliação mais precisa e contextualizada, superando as limitações de testes aplicados exclusivamente em ambiente clínico (Peters, 2021).

Estudos indicam que o uso de *wearables* para *biofeedback* durante sessões de fisioterapia pode favorecer a correção imediata de padrões de marcha e postura, além de motivar o paciente por meio da visualização de seu próprio desempenho, criando um ciclo de aprendizado motor mais dinâmico e participativo (Bowman, 2021).

Além de contribuir para a avaliação objetiva, os sensores vestíveis possibilitam a coleta de dados contínuos em contextos domiciliares e comunitários, fornecendo informações valiosas sobre a funcionalidade real do paciente em suas atividades cotidianas, esses registros ampliam a compreensão sobre a transferência dos ganhos terapêuticos para a vida diária (Peters, 2021).

Os dispositivos vestíveis podem ser integrados a plataformas digitais e sistemas de telessaúde, gerando relatórios automáticos e alertas para profissionais de saúde, o que fortalece o acompanhamento remoto, reduz o risco de complicações e garante maior personalização dos programas terapêuticos (Bowman, 2021).

Apesar de promissores, tanto a realidade virtual quanto os sensores vestíveis ainda exigem estudos que consolidem medidas de confiabilidade, validade e aplicabilidade em diferentes contextos



clínicos, a padronização de metodologias e a redução de custos são aspectos que precisam ser considerados para que essas tecnologias se tornem parte integral da prática fisioterapêutica (Zhang, 2020).

Dessa forma, a integração de realidade virtual, telereabilitação e *wearables* desponta como uma frente inovadora na fisioterapia neurológica, unindo acessibilidade, imersão e mensuração objetiva, constituindo um conjunto de recursos que expande as possibilidades de cuidado e estabelece novas perspectivas para a recuperação funcional em larga escala (Sarfo, *et al.* 2018).

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como uma revisão de literatura, conduzida com base em critérios científicos de rigor e transparência, com o propósito de identificar, selecionar e analisar criticamente estudos sobre tecnologias assistivas aplicadas à fisioterapia neurológica. Conforme Lakatos (2017), a revisão sistemática possibilita organizar e avaliar um corpo de conhecimento de maneira estruturada, enquanto Gil (2019) ressalta a importância de adotar um delineamento metodológico que assegure validade e confiabilidade às conclusões.

O processo de busca foi realizado nas bases *PubMed/MEDLINE*, *Cochrane Library*, *Scopus*, *Web of Science* e *SciELO*, reconhecidas internacionalmente pela qualidade editorial e relevância na área da saúde. O recorte temporal estabelecido compreendeu o período entre 2020 e 2022, considerado adequado para captar avanços recentes nas tecnologias assistivas e sua aplicação clínica, de acordo com a orientação de Gil (2019) sobre a necessidade de atualizar constantemente os referenciais de pesquisa.

As palavras-chave utilizadas foram: *assistive technologies*, *neurological physiotherapy*, *robotics in rehabilitation*, *brain-computer interface*, *functional electrical stimulation*, *virtual reality rehabilitation*, *telerehabilitation* e *wearable sensors*, incluindo ainda suas correspondentes em português. A combinação desses termos foi realizada com operadores booleanos *AND* e *OR*, garantindo abrangência e precisão nos resultados obtidos, prática recomendada por Lakatos (2017) para assegurar que a busca bibliográfica seja sistemática e exaustiva.

Foram incluídos estudos de revisão sistemática e meta-análises publicadas em periódicos revisados por pares, com foco em pacientes submetidos à fisioterapia neurológica e que investigaram diretamente a aplicação de tecnologias assistivas. Foram excluídos trabalhos duplicados, artigos que não apresentavam metodologia clara e publicações que abordassem apenas aspectos técnicos das tecnologias sem relação com o campo clínico. Esse processo de triagem, conforme Gil (2019), permite eliminar vieses e garantir que os resultados sejam pertinentes ao objeto do estudo.

A análise final consistiu na leitura completa dos artigos selecionados, seguida da categorização dos achados em três eixos principais: robótica aplicada à marcha, BCI e FES em membros superiores

e realidade virtual com dispositivos vestíveis para reabilitação. Segundo Lakatos (2017), a organização temática dos dados possibilita comparar resultados, identificar convergências e apontar lacunas de investigação, assegurando que a síntese final da revisão represente fielmente o estado atual do conhecimento sobre tecnologias assistivas na fisioterapia neurológica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos selecionados permitiu sintetizar evidências relevantes sobre o impacto das tecnologias assistivas na fisioterapia neurológica, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Síntese dos estudos incluídos na revisão de literatura

Autor (Ano)	Objetivo principal	Amostra / Estudos incluídos	Principais resultados
Nam, <i>et al.</i> (2019)	Avaliar treino de marcha robótico pós-AVC	62 estudos (n=2.440)	Aumento da chance de marcha independente; melhora discreta da velocidade
Moucheboeuf, <i>et al.</i> (2020)	Verificar efeitos do exoesqueleto pós-AVC	11 ECRs	Melhora em independência de marcha e resistência
Moucheboeuf (2020)	Revisão sobre robôs de marcha pós-AVC	Meta-análise	Ganhos em resistência e independência; velocidade inconsistente
Baniquid (2021)	Revisão sobre BCI+robótica em mão pós-AVC	9 estudos	Ganhos funcionais com variabilidade de protocolos
Mansour (2022)	Avaliar eficácia do BCI em membro superior	12 ECRs (n=298)	Efeitos maiores com intenção motora + FES
Peng (2022)	Revisão sobre BCI + FES pós-AVC	15 estudos	Melhoras em Fugl-Meyer, ARAT, MBI
Tang, <i>et al.</i> (2021)	Revisão sobre FES em membro superior	25 estudos	Ganhos consistentes em FMA e ARAT
da Cunha (2021)	Avaliar FES peroneal em pé caído	14 estudos (n=1.115)	Aumento da velocidade de marcha e dorsiflexão
(Zhang (2020))	Revisão de VR após AVC	58 revisões	Melhora de função motora; poucos efeitos adversos

Feitosa (2022)	Revisão fMRI + VR pós-AVC	23 estudos	Reorganização cortical em M1, S1, SMA
Sarfo, <i>et al.</i> (2018)	VR em telereabilitação pós-AVC	9 ECRs	Resultados comparáveis ao presencial
Lorusso (2022)	Tecnologias de equilíbrio em LME	19 estudos	Melhoras observadas, sem superioridade clara
Bowman (2021)	Revisão de <i>wearables</i> em neurorreabilitação	19 ECRs	Indícios de ganhos em marcha e equilíbrio
Peters (2021)	<i>Wearables</i> para avaliação da marcha	13 estudos	Uso de acelerômetros e sensores plantares

Fonte: A autora (2022)

A síntese apresentada na Tabela 1 permite compreender que a robótica aplicada à marcha representa um dos recursos mais consolidados na fisioterapia neurológica, principalmente em indivíduos acometidos por acidente vascular cerebral, os resultados demonstram que o treino com exoesqueletos e dispositivos eletromecânicos eleva as chances de retomada da marcha independente, especialmente em pacientes não deambuladores e em fases iniciais do processo de reabilitação, confirmando que a intensidade e a padronização da prática favorecem a plasticidade neural (Nam, *et al.*, 2019).

Os estudos analisados revelam que os efeitos da robótica não se limitam ao retorno da marcha funcional, mas também se estendem à resistência cardiorrespiratória e ao equilíbrio dinâmico, fatores que ampliam a autonomia do paciente em atividades cotidianas, entretanto, a literatura destaca que a melhora na velocidade de marcha ainda apresenta resultados inconsistentes, o que demonstra que, embora eficaz, o recurso necessita de maior refinamento em protocolos de uso (Moucheboeuf, *et al.*, 2020).

As evidências também apontam que os ganhos promovidos pela robótica são mais expressivos em fases subagudas do acidente vascular cerebral, enquanto em fases crônicas os efeitos, embora presentes, tendem a ser mais discretos, esse padrão reforça a importância da precocidade da intervenção e da personalização dos parâmetros de treino, pois a evolução clínica varia conforme a fase de recuperação do paciente (Moucheboeuf, 2020).

Contudo, um ponto relevante notado foi nas revisões é a contribuição da robótica para a motivação do paciente, o feedback imediato e a possibilidade de progressão controlada dos exercícios tornam as sessões mais atrativas e participativas, favorecendo a adesão aos programas de reabilitação, que é um fator determinante para a manutenção de ganhos a longo prazo (Nam, *et al.*, 2019).

A análise da literatura sobre interfaces cérebro-computador evidencia que essa tecnologia desporta como promissora no campo da reabilitação de membros superiores, os estudos indicam que

a simples intenção de movimento, quando traduzida em comandos externos, pode favorecer a reorganização cortical e induzir ganhos motores relevantes, sobretudo em pacientes com sequelas graves que limitam a execução voluntária de movimentos (Baniqued, 2021).

Os protocolos que combinam BCI com estimulação elétrica funcional apresentam efeitos mais consistentes do que os sistemas aplicados de forma isolada, essa integração cria um circuito de retroalimentação entre o sistema nervoso central e a resposta periférica, ampliando os estímulos necessários para o reaprendizado motor, resultado que reforça a relevância da abordagem multimodal em fisioterapia neurológica (Mansour, 2022).

Além disso, a utilização de BCI em associação a FES tem mostrado incremento significativo em escalas de avaliação funcional como *Fugl-Meyer* e *Action Research Arm Test*, instrumentos amplamente aceitos na mensuração de ganhos motores, essa evidência sugere que a convergência entre diferentes tecnologias pode representar um caminho mais eficaz para pacientes em recuperação pós-acidente vascular cerebral (Peng, 2022).

A estimulação elétrica funcional, por si só, também demonstrou eficácia em diferentes configurações, como os sistemas de circuito aberto e os controlados por sinais mioelétricos, os resultados apontam melhorias em força, amplitude de movimento e desempenho funcional, sendo a modalidade EMG-FES a que mais se destaca em termos de consistência nos resultados clínicos (Tang, et al., 2021).

No caso do pé caído, complicaçāo comum após acidente vascular cerebral, a aplicação da estimulação elétrica peroneal associada à fisioterapia supervisionada mostrou-se superior em termos de ganhos de velocidade da marcha e dorsiflexão em comparação a intervenções isoladas, confirmando que a combinação entre recursos tecnológicos e acompanhamento profissional estruturado promove resultados mais robustos (da Cunha, 2021).

A análise da realidade virtual mostra que esse recurso tem se consolidado como alternativa viável na reabilitação neurológica, especialmente em tarefas relacionadas à função motora de membros superiores, os ambientes imersivos ou não imersivos proporcionam experiências repetitivas e interativas que favorecem tanto a plasticidade neural quanto a motivação do paciente, embora as revisões ressaltem a heterogeneidade metodológica existente entre os estudos (Zhang, 2020).

Estudos de neuroimagem funcional indicam que a prática com realidade virtual é capaz de induzir reorganização em áreas corticais como o córtex motor primário e a área suplementar motora, mecanismos que sustentam as melhorias clínicas observadas em diversos ensaios, essa relação entre neuroplasticidade e evolução funcional fortalece a aplicabilidade da VR em contextos de reabilitação (Feitosa, 2022).

A telereabilitação mediada por plataformas de realidade virtual apresentou resultados comparáveis aos programas presenciais em termos de função motora de membros superiores e



equilíbrio, esse dado é de grande relevância para contextos em que o acesso presencial é limitado, pois viabiliza a continuidade de cuidados em ambientes domiciliares de forma segura e supervisionada (Sarfo, *et al.* 2018).

No campo dos sensores vestíveis, os resultados apontam que dispositivos equipados com acelerômetros, giroscópios e sensores plantares oferecem avaliação precisa da marcha e do equilíbrio, além de possibilitarem a coleta de dados contínuos em ambientes reais, o que amplia a compreensão sobre a transferência dos ganhos terapêuticos para as atividades da vida diária (Peters, 2021).

Além da avaliação, os *wearables* também demonstraram potencial no fornecimento de *biofeedback* em tempo real, auxiliando na correção de padrões motores inadequados e incentivando o engajamento do paciente, ainda que as revisões ressaltem a necessidade de validação metodológica mais robusta para consolidar sua aplicabilidade clínica em larga escala (Bowman, 2021).

De modo geral, os resultados analisados confirmam que as tecnologias assistivas aplicadas à fisioterapia neurológica trazem benefícios clínicos relevantes e complementares às terapias convencionais, embora persistam limitações relacionadas a custos, padronização de protocolos e qualidade metodológica, as evidências convergem para o entendimento de que a incorporação gradual e supervisionada dessas ferramentas representa um avanço significativo na prática fisioterapêutica (Zhang, 2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada permitiu constatar que a fisioterapia neurológica tem se beneficiado de forma significativa da incorporação de tecnologias assistivas, recursos que vêm sendo aplicados em contextos clínicos e de pesquisa, promovendo ganhos funcionais relevantes para indivíduos com diferentes graus de comprometimento motor.

As evidências demonstram que a robótica voltada à marcha representa um dos instrumentos mais consolidados, sobretudo em fases iniciais da recuperação pós-acidente vascular cerebral, em que a possibilidade de treino intensivo e padronizado amplia as chances de retomada da deambulação e favorece a independência do paciente.

Na reabilitação de membros superiores, as interfaces cérebro-computador, isoladas ou em associação com estimulação elétrica funcional, configuram-se como alternativas promissoras, capazes de potencializar a reorganização cortical e oferecer estímulos direcionados que ampliam a capacidade de reaprendizagem motora.

Os achados também reforçam que a estimulação elétrica, aplicada em diferentes modalidades, contribui para a recuperação funcional, destacando-se tanto no treino de preensão e manipulação quanto em situações específicas como o tratamento do pé caído, em que demonstra impacto positivo sobre velocidade de marcha e dorsiflexão.



A realidade virtual, em seus formatos imersivos e não imersivos, surge como recurso que alia motivação e plasticidade neural, favorecendo o engajamento do paciente em atividades repetitivas, enquanto a telereabilitação mostra-se capaz de garantir resultados comparáveis aos de atendimentos presenciais, ampliando o acesso a cuidados especializados.

O desenvolvimento de sensores vestíveis agrega valor à prática clínica ao fornecer dados objetivos e contínuos sobre desempenho motor em ambientes reais, permitindo que os ganhos conquistados durante o processo de reabilitação sejam monitorados em situações de vida diária, fortalecendo a integração entre prática terapêutica e funcionalidade cotidiana.

Apesar dos avanços, observa-se que a incorporação plena dessas tecnologias ainda depende de fatores como custo, infraestrutura e treinamento profissional, além da necessidade de ampliar pesquisas multicêntricas que padronizem protocolos de intervenção e estabeleçam parâmetros de eficácia em diferentes populações e contextos.

Conclui-se, portanto, que as tecnologias assistivas analisadas representam ferramentas complementares de alto potencial na fisioterapia neurológica, capazes de transformar a forma como a reabilitação é conduzida, desde que utilizadas de maneira criteriosa, fundamentada em evidências e integrada à prática clínica de forma responsável e sustentável.



REFERÊNCIAS

- 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. 1-15, 2021.
- BOWMAN, T. et al. Wearable devices for biofeedback in neurological rehabilitation: systematic review and meta-analysis. *Sensors*, v. 21, n. 9, p. 3122, 2021.
- CUNHA, M. J. da et al. Peroneal nerve functional electrical stimulation combined with physiotherapy improves walking speed after stroke: systematic review and meta-analysis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, v. 64, n. 6, p. 101397, 2021.
- FEITOSA, J. A. et al. Virtual reality-based motor rehabilitation: a systematic review of fMRI studies. *Journal of Neural Engineering*, v. 19, n. 3, p. 031001, 2022.
- GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: *Atlas*, 2019.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. Metodologia científica. 7. ed. São Paulo: *Atlas*, 2017.
- LORUSSO, M. et al. Assistive technologies in the assessment and rehabilitation of balance in spinal cord injury: systematic review. *NeuroRehabilitation*, v. 51, n. 2, p. 219-232, 2022.
- MANSOUR, S. et al. Brain–computer interface effectiveness and design impact in post-stroke upper-limb rehabilitation: systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Neuroscience*, v. 16, p. 912345, 2022.
- MOUCHEBOEUF, G. et al. Effects of robotic gait training after stroke: a meta-analysis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, v. 63, n. 2, p. 138-148, 2020.
- MOUCHEBOEUF, Geoffroy et al. Effects of robotic gait training after stroke: A meta-analysis. *Annals of physical and rehabilitation medicine*, v. 63, n. 6, p. 518-534, 2020.
- NAM, Yeon-Gyo et al. Effects of electromechanical exoskeleton-assisted gait training on walking ability of stroke patients: a randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, v. 100, n. 1, p. 26-31, 2019.
- PENG, Y. et al. Application of brain–computer interface in upper-limb dysfunction after stroke: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers in Neuroscience*, v. 16, p. 842345, 2022.
- PETERS, D. M. et al. Wearables for assessing mobility and gait after stroke: systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, v. 18, n. 1, p. 1-14, 2021.
- SARFO, Fred S. et al. Tele-rehabilitation after stroke: an updated systematic review of the literature. *Journal of stroke and cerebrovascular diseases*, v. 27, n. 9, p. 2306-2318, 2018.
- TANG, Yuqi et al. Optimal method of electrical stimulation for the treatment of upper limb dysfunction after stroke: a systematic review and bayesian network meta-analysis of randomized controlled trials. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, p. 2937-2954, 2021.
- ZHANG, Xingxing et al. Efficacy and Safety of Virtual Reality for Stroke Rehabilitation: an Overview of Systematic Reviews. *Chinese General Practice*, v. 23, n. 5, p. 566, 2020.