NEUROESTIMULAÇÃO MEDULAR NA DOR NEUROPÁTICA CRÔNICA: MECANISMOS, EVIDÊNCIAS E AVANÇOS TECNOLÓGICOS

Bianca Sampaio Paulo, Patrícia Marcondes dos Santos.

Universidade do Vale do Paraíba, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, **bsampaiopaulo@gmail.com**

Resumo

A estimulação da medula espinhal (*Spinal Cord Stimulation* - SCS) destaca-se como alternativa promissora para o controle de dores neuropáticas crônicas que não respondem aos tratamentos convencionais. Esta revisão narrativa examinou as bases neurofisiológicas, o suporte clínico e as inovações tecnológicas da técnica com base nas plataformas PubMed, SciELO e Google Scholar. Os resultados mostram que a terapia atua além do controle do portão, recrutando circuitos inibitórios locais e vias supraespinhais. Ao lado da consolidação clínica em grupos selecionados, abordagens em alta frequência e malha fechada (*closed-loop*) trazem ajustes mais dinâmicos ao tecido neural. Embora custos e riscos cirúrgicos ainda imponham cautela, a SCS consolida-se como ferramenta relevante quando aliada a indicações precisas e seguimento individualizado.

Palavras-chave: *Estimulação da medula espinhal. Neuromodulação. Dor neuropática. Neuroestimulação. Tecnologia médica.*

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Biomédica.

Introdução

Lidar com a dor neuropática crônica continua sendo uma das tarefas mais complexas da prática médica. Decorrente de lesões ou disfunções no sistema somatossensorial, esse tipo de dor costuma responder de forma discreta a medicamentos analgésicos e intervenções fisioterápicas. Conforme o quadro se prolonga, o impacto sobre o sono, a rotina profissional e a autonomia do paciente tornam-se profundo, abrindo espaço para terapias intervencionistas quando as alternativas não invasivas se mostram insuficientes. É nesse cenário de dor refratária que a neuromodulação ganhou protagonismo nas últimas décadas.

Entre as técnicas disponíveis, a estimulação da medula espinhal (*Spinal Cord Stimulation* - SCS) atua por meio de eletrodos inseridos no espaço epidural. Ao aplicar correntes elétricas direcionadas, o dispositivo modula a transmissão das mensagens dolorosas antes que elas alcancem centros corticais de percepção. Desde as primeiras aplicações clínicas descritas por Shealy, Mortimer e Reswick (1967), os modelos explicativos mudaram bastante. Se no início a teoria da comporta (controle do portão) parecia suficiente para explicar os resultados, hoje se sabe que a resposta envolve uma rede muito mais ampla, articulando interneurônios do corno dorsal, neurotransmissores específicos e vias inibitórias descendentes (Linderoth; Foreman, 1999; Moayedi; Davis, 2013).

Acompanhando os avanços da Engenharia Biomédica, os aparelhos também passaram por transformações importantes. Os sistemas tradicionais de baixa frequência ganharam a companhia de estimulações em alta frequência e de dispositivos inteligentes em malha fechada, capazes de ler a atividade elétrica medular e dosar o estímulo em tempo real. Embora esse leque tecnológico traga novas perspectivas para pacientes com dor crônica, ele também exige cautela para determinar em quais perfis de pacientes cada abordagem é realmente vantajosa. Diante disso, este trabalho buscou revisar os fundamentos neurofisiológicos da SCS, avaliar suas evidências clínicas de eficácia e discutir os caminhos abertos pelas inovações tecnológicas mais recentes, ressaltando os desafios que ainda cercam sua aplicação.

Metodologia

Esta pesquisa foi desenvolvida no formato de revisão narrativa da literatura, estruturada a partir de levantamentos realizados em agosto de 2026 nas bases de dados PubMed, SciELO e Google Scholar. As estratégias de busca combinaram operadores booleanos e termos em inglês consagrados na área:

"spinal cord stimulation", *"neuromodulation"*, *"neuropathic pain"*, *"chronic pain"*, *"high-frequency spinal cord stimulation"* e *"closed-loop spinal cord stimulation"*.

Para avaliar o corpo de evidências clínicas e consensos de forma consistente, delimitou-se o período de publicação entre 2007 e 2026. O marco temporal em 2007 justifica-se pela importância histórica do ensaio clínico conduzido por Kumar *et al.* (2007). Esse trabalho estabeleceu um parâmetro metodológico essencial para a área ao comparar, de forma randomizada e controlada, a eficácia da estimulação medular com o manejo médico convencional em pacientes operados de coluna. Estudos conceituais anteriores a 2007 foram recuperados pontualmente apenas para embasar o contexto histórico da técnica e seus mecanismos neurofisiológicos fundamentais.

Excluíram-se do levantamento artigos duplicados, publicações cujo foco divergia do escopo temático ou que não apresentavam detalhes metodológicos suficientes para uma análise criteriosa. O conjunto selecionado para compor o núcleo da análise clínica e tecnológica reuniu quatro estudos representativos, organizados em formato de tabela comparativa, complementados por consensos de prática clínica e artigos de revisão teórica que deram sustentação à discussão.

Resultados

Ao examinar os dados da literatura, fica evidente que o alívio doloroso proporcionado pela SCS não decorre apenas do bloqueio físico simples na entrada da medula. Embora a ativação de fibras grossas mielinizadas continue sendo relevante, o estímulo elétrico induz respostas neuroquímicas locais e aciona circuitos inibitórios que partem do tronco encefálico. Essa combinação significa que a eficácia da terapia depende diretamente da harmonia entre os parâmetros do pulso, o posicionamento exato do eletrodo e a integridade funcional do sistema nervoso de cada indivíduo (Linderoth; Foreman, 1999; Verrills; Sinclair; Barnard, 2016).

No campo clínico, a relevância do método para a síndrome da dor pós-laminectomia (dor persistente após cirurgia na coluna com acometimento ciático) ganhou solidez com o estudo de Kumar *et al.* (2007). Acompanhando 100 participantes randomizados, os autores observaram que 48% daqueles que receberam o implante alcançaram redução de pelo menos metade da intensidade da dor nas pernas aos seis meses de seguimento, contra apenas 9% no grupo mantido exclusivamente em terapia médica convencional. Esse resultado demonstrou a utilidade do recurso para casos bem definidos, servindo também de alerta contraindicações genéricas para qualquer tipo de dor lombar.

Paralelamente, a engenharia dos dispositivos trouxe mudanças expressivas. O ensaio SENZA-RCT comparou a estimulação padrão com a tecnologia de alta frequência em 10 kHz em 198 pacientes com queixas lombares e radiculares. Aos três meses, a proporção de pacientes com melhora significativa na dor lombar chegou a 84,5% na modalidade de 10 kHz, frente a 43,8% na forma convencional, mantendo vantagem semelhante para a dor em membros inferiores (Kapural *et al.*, 2015). Outro passo importante veio com os sistemas de malha fechada (*closed-loop*), que leem potenciais de ação evocados para autorregular a intensidade da corrente. No ensaio EVOKE, após 36 meses de acompanhamento, o grupo que utilizou malha fechada sustentou 77,6% de alívio doloroso igual ou superior a 50%, superando com folga os 49,3% registrados na estimulação de malha aberta (Mekhail *et al.*, 2024).

Tabela 1 - Síntese das principais evidências clínicas e tecnológicas.

Estudo/eixo	Resultado destacado	Interpretação
Kumar *et al.* (2007)	48% versus 9% de respondedores para dor radicular em 6 meses.	Evidência favorável em síndrome pós-cirurgia da coluna com seleção específica.
Kapural *et al.* (2015)	SCS em 10 kHz apresentou maior proporção de respondedores que SCS convencional.	Mostra que a forma de estimulação influencia o desfecho clínico.
Mekhail *et al. (*2024)	Malha fechada manteve maior proporção de respondedores em 36 meses.	Sinal neurofisiológico pode ser incorporado à realimentação do dispositivo.
Andrade *et al.* (2016)	Estudos pequenos avaliaram SCS em sintomas motores da doença de Parkinson.	Aplicação neurológica ainda investigacional e com evidência limitada.

Fonte: elaborado pela autora com base nos estudos analisados.

Apesar desses números favoráveis, diretrizes recentes lembram que no sucesso do procedimento está atrelado a um processo rigoroso de triagem. É fundamental investigar aspectos psicossociais, alinhar expectativas e submeter o paciente a uma fase de teste antes de fixar o gerador definitivo (Shanthanna *et al.*, 2023). Como se trata de uma intervenção cirúrgica, persistem riscos inerentes como infecções, deslocamento de cabos e necessidade de novas operações. Assim, os avanços nos aparelhos tornam a estimulação mais eficiente, mas não eliminam a necessidade de um acompanhamento multidisciplinar cuidadoso.

Discussão

Quando os artigos são avaliados em conjunto, fica claro que a neuroestimulação medular tem respaldo consistente na dor neuropática, desde que os limites da indicação sejam respeitados. Generalizar resultados de ensaios com critérios tão estritos pode levar a frustrações clínicas. Do mesmo modo, resumir o efeito analgésico ao mecanismo de comportas de décadas atrás empobrece a compreensão biológica de um processo que envolve modulações supraespinhais dinâmicas e reorganização neuroquímica complexa.

A área migrou de estimuladores rígidos, que emitiam pulsos idênticos independentemente da posição corporal do indivíduo, para arquiteturas inteligentes. A malha fechada exemplifica bem essa virada conceitual: os biopotenciais gerados pela própria medula deixam de ser simples marcadores de monitoramento e passam a guiar ativamente a entrega de energia. Estabelece-se uma ponte de controle adaptativo entre o circuito eletrônico e o sistema nervoso.

Por outro lado, avaliar o sucesso dessas intervenções apenas pela escala visual da dor é uma métrica incompleta. É preciso acompanhar se o paciente retomou atividades cotidianas, reduziu doses de opioides e se os ganhos se sustentam ao longo dos anos. Além disso, a heterogeneidade metodológica entre diferentes ensaios dificulta a comparação direta entre marcas e padrões de onda. Já o uso da SCS fora do domínio da dor, como nas manifestações motoras do Parkinson avaliadas por Andrade *et al.* (2016), demonstra o potencial de expansão da tecnologia, embora ainda demande ensaios maiores para se transformar em conduta rotineira.

Em síntese, o futuro da neuroestimulação caminha em duas direções que se complementam: o aprimoramento clínico na seleção de candidatos e a evolução técnica no processamento de sinais e na durabilidade dos sistemas implantáveis. Para os profissionais da bioengenharia, o desafio envolve desenhar interfaces cada vez mais integradas, confiáveis e acessíveis, unindo algoritmos de controle à fisiologia humana.

Conclusão

A estimulação da medula espinhal representa hoje um recurso terapêutico maduro e indispensável no manejo de dores neuropáticas crônicas que desafiam a farmacologia tradicional. Os dados científicos confirmam que sua ação decorre de uma modulação neuroquímica e estrutural sofisticada, superando modelos teóricos puramente mecânicos. A incorporação de frequências elevadas e da realimentação em malha fechada trouxe ganhos clínicos substanciais, conferindo maior precisão ao tratamento. Contudo, custos elevados e o manejo de potenciais complicações pós-operatórias continuam exigindo discernimento da equipe de saúde. O fortalecimento da técnica dependerá de pesquisas clínicas de longo prazo e de uma interlocução estreita entre a engenharia e a prática médica.

Referências

ANDRADE, E. M. *et al.* Spinal cord stimulation for Parkinson's disease: a systematic review. **Neurosurgical Review**, v. 39, n. 1, p. 27-35, 2016. DOI: 10.1007/s10143-015-0651-1.

KAPURAL, L. *et al.* Novel 10-kHz high-frequency therapy (HF10 therapy) is superior to traditional low-frequency spinal cord stimulation for the treatment of chronic back and leg pain: the SENZA-RCT randomized controlled trial. **Anesthesiology**, v. 123, n. 4, p. 851-860, 2015. DOI: 10.1097/ALN.0000000000000774.

KUMAR, K. *et al.* Spinal cord stimulation versus conventional medical management for neuropathic pain: a multicentre randomised controlled trial in patients with failed back surgery syndrome. **Pain**, v. 132, n. 1-2, p. 179-188, 2007. DOI: 10.1016/j.pain.2007.07.028.

LINDEROTH, B.; FOREMAN, R. D. Physiology of spinal cord stimulation: review and update. **Neuromodulation**, v. 2, n. 3, p. 150-164, 1999. DOI: 10.1046/j.1525-1403.1999.00150.x.

MEKHAIL, N. *et al.* Long-term safety and efficacy of closed-loop spinal cord stimulation to treat chronic back and leg pain (Evoke): a double-blind, randomised, controlled trial. **The Lancet Neurology**, v. 19, n. 2, p. 123-134, 2020. DOI: 10.1016/S1474-4422(19)30414-4.

MEKHAIL, N. A. *et al.* ECAP-controlled closed-loop versus open-loop SCS for the treatment of chronic pain: 36-month results of the EVOKE blinded randomized clinical trial. **Regional Anesthesia and Pain Medicine**, v. 49, n. 5, p. 346-354, 2024. DOI: 10.1136/rapm-2023-104751.

MOAYEDI, M.; DAVIS, K. D. Theories of pain: from specificity to gate control. **Journal of Neurophysiology**, v. 109, n. 1, p. 5-12, 2013.

SHANTHANNA, H. *et al.* Evidence-based consensus guidelines on patient selection and trial stimulation for spinal cord stimulation therapy for chronic non-cancer pain. **Regional Anesthesia and Pain Medicine**, v. 48, n. 6, p. 273-287, 2023. DOI: 10.1136/rapm-2022-104097.

SHEALY, C. N.; MORTIMER, J. T.; RESWICK, J. B. Electrical inhibition of pain by stimulation of the dorsal columns. **Anesthesia & Analgesia**, v. 46, n. 4, p. 489-491, 1967.

VERRILLS, P.; SINCLAIR, C.; BARNARD, A. A review of spinal cord stimulation systems for chronic pain. **Journal of Pain Research**, v. 9, p. 481-492, 2016.