




CAPÍTULO 10

Estimulação epidural na lesão medular crônica: evidências atuais e aplicações clínicas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7961126300110>

Emerson de Carvalho

Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA), Porto Alegre – RS, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2611165494131624>

Luis Henrique Amodeo Vian (Coautor)

Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA), Porto Alegre – RS, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8960778358125605>

Arthur Both Lahude (Coautor)

Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA), Porto Alegre – RS, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7670533900726074>

Jéssica da Silva Lamp

Orientadora

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2684951705249242>

RESUMO: A lesão medular (LM) crônica está associada à interrupção das vias neurais descendentes, comprometendo o controle motor voluntário e funções autonômicas abaixo do nível da lesão. Este capítulo teve como objetivo revisar sistematicamente a literatura científica sobre estimulação elétrica epidural (EES), examinando a hipótese de que circuitos neurais sublesionais permanecem estruturalmente preservados, embora funcionalmente inativos, e possam ser modulados por neuromodulação espinal para favorecer a recuperação motora. A metodologia consistiu em revisão sistematizada conduzida nas bases PubMed, Scopus, Web of Science e Embase, incluindo ensaios clínicos e estudos clássicos publicados entre 2011 e 2026, envolvendo indivíduos com LM crônica classificados entre AIS A e D. As evidências analisadas indicam que a EES aumenta a excitabilidade dos circuitos espinais, modula os Geradores de Padrão Centrais (CPGs) e pode favorecer a reativação de

vias neurais latentes. Estudos recentes demonstram que, particularmente quando associada ao treinamento locomotor intensivo, a neuromodulação epidural tem sido relacionada à recuperação de funções como marcha, ortostatismo, controle de tronco e modulação autonômica em indivíduos selecionados. Conclui-se que a EES, integrada à reabilitação fisioterapêutica intensiva, representa uma estratégia promissora na neuroreabilitação da lesão medular crônica, com potencial para ampliar perspectivas funcionais e contribuir para a redefinição dos prognósticos motores nessa população.

PALAVRAS-CHAVE: Estimulação Epidural. Lesão Medular. Reabilitação Neurofuncional. Controle Motor. Neuromodulação.

Epidural stimulation in chronic spinal cord injury: Current Evidence and Clinical Applications

ABSTRACT: Chronic spinal cord injury (SCI) is associated with disruption of descending neural pathways, impairing voluntary motor control and autonomic functions below the level of injury. This chapter aimed to systematically review the scientific literature on epidural electrical stimulation (EES), examining the hypothesis that sublesional neural circuits may remain structurally preserved, although functionally inactive, and may be modulated through spinal neuromodulation to facilitate motor recovery. The methodology consisted of a systematized review conducted in the PubMed, Scopus, Web of Science, and Embase databases, including clinical trials and seminal studies published between 2011 and 2026, involving individuals with chronic SCI classified as AIS A to D. The evidence analyzed indicates that EES increases the excitability of spinal circuits, modulates Central Pattern Generators (CPGs), and may promote the reactivation of latent neural pathways. Recent studies demonstrate that, particularly when combined with intensive locomotor training, epidural neuromodulation has been associated with the recovery of functions such as gait, independent standing, trunk control, and autonomic modulation in selected individuals. It is concluded that EES, integrated with intensive physiotherapeutic rehabilitation, represents a promising strategy in the neurorehabilitation of chronic spinal cord injury, with the potential to expand functional outcomes and contribute to redefining motor prognoses in this population.

KEYWORDS: Epidural Stimulation. Spinal Cord Injury. Neurofunctional Rehabilitation. Motor Control. Neuromodulation.

INTRODUÇÃO

A lesão medular (LM) constitui uma das condições neurológicas de maior impacto funcional, caracterizada pela interrupção parcial ou total das vias ascendentes e descendentes da medula espinhal. Como consequência, podem ocorrer déficits motores, sensoriais e autonômicos abaixo do nível da lesão, frequentemente com repercussões significativas sobre a funcionalidade e a independência. Historicamente, indivíduos com lesão medular crônica e clinicamente completa (American Spinal Injury Association Impairment Scale — AIS A) eram considerados incapazes de recuperar função motora voluntária, sendo as intervenções tradicionalmente direcionadas à compensação e adaptação funcional. Contudo, avanços na neurofisiologia têm demonstrado que circuitos neurais localizados caudalmente à lesão, incluindo redes interneuronais da intumescência lombo-sacral, frequentemente permanecem estruturalmente preservados, porém em estado de latência funcional, em razão da redução ou ausência de drive excitatório supraespinhal. (Harkema et al., 2011; Edgerton e Harkema, 2011; Guertin, 2013).

A constatação de que a medula espinhal isolada possui capacidade intrínseca para processar informações sensoriais e gerar padrões motores rítmicos modificou de forma significativa os paradigmas da neuroreabilitação. Esses circuitos, frequentemente denominados Geradores de Padrão Central (Central Pattern Generators — CPGs), podem ser modulados ou reativados por estímulos exógenos apropriados. Nesse contexto, a estimulação elétrica epidural (EES) emergiu como uma estratégia promissora de neuromodulação. A aplicação de correntes elétricas contínuas ou espacialmente direcionadas sobre a dura-máter lombo-sacral pode elevar o estado basal de excitabilidade dos circuitos espinais, aproximando motoneurônios e redes interneuronais do limiar de ativação. Essa modulação favorece que sinais proprioceptivos aferentes e comandos voluntários residuais, anteriormente insuficientes para produzir resposta motora efetiva, sejam processados e convertidos em atividade motora funcional. (Wagner et al., 2018; Kathe et al., 2022; Angeli et al., 2018).

A justificativa para o uso da EES fundamenta-se nos princípios da neuroplasticidade atividade-dependente. Isoladamente, a estimulação epidural não produz recuperação motora, mas pode atuar como facilitadora da responsividade dos circuitos espinais. Nesse contexto, a associação entre EES, treinamento locomotor intensivo e intenção voluntária tem sido relacionada à reorganização sináptica e ao fortalecimento funcional de vias neurais remanescentes (Gill et al., 2018; Capogrosso et al., 2016; Minassian et al., 2016). Estudos clínicos têm demonstrado que indivíduos com lesão medular crônica torácica ou cervical podem apresentar ganhos em ortostatismo, marcha, controle postural e funções autonômicas, sugerindo potencial terapêutico dessa abordagem. (Lorach et al., 2023; Romeni et al., 2025; Angeli et al., 2025).

Diante desse cenário de avanços translacionais, torna-se relevante sistematizar as evidências disponíveis acerca dos mecanismos neurofisiológicos e dos desfechos clínicos associados à estimulação elétrica epidural. Assim, este capítulo tem como objetivo realizar uma revisão sistematizada da literatura sobre a preservação funcional dos circuitos neurais abaixo da lesão, o papel da estimulação epidural na modulação da excitabilidade espinhal e seu potencial de favorecer respostas motoras mediadas por vias remanescentes. Além disso, busca-se analisar as evidências sobre a associação entre estimulação elétrica epidural e treinamento fisioterapêutico intensivo como estratégia terapêutica para a neuroreabilitação em indivíduos com lesão medular crônica.

METODOLOGIA

A fim de contemplar o objetivo proposto, este capítulo foi estruturado como uma revisão sistematizada da literatura científica, com busca e análise de estudos relacionados à estimulação elétrica epidural em indivíduos com lesão medular crônica. A estratégia de busca foi direcionada para identificar estudos clássicos e ensaios clínicos contemporâneos que investigaram os efeitos dessa intervenção sobre desfechos motores e autonômicos.

As buscas foram conduzidas de forma abrangente nas seguintes bases de dados eletrônicas: PubMed (MEDLINE), Scopus, Web of Science e Embase. Para garantir a sensibilidade e especificidade da recuperação, utilizou-se uma combinação de descritores indexados (MeSH e DeCS) e termos livres, interligados pelos operadores booleanos "AND" e "OR". A estratégia de busca principal incluiu os seguintes termos: ("*epidural stimulation*" OR "*spinal cord stimulation*" OR "*neuromodulation*") AND ("*spinal cord injury*" OR "*paraplegia*" OR "*tetraplegia*") AND ("*motor recovery*" OR "*voluntary movement*" OR "*locomotion*" OR "*central pattern generators*").

Os critérios de inclusão estabelecidos para a seleção dos artigos foram: (a) estudos clínicos envolvendo participantes humanos diagnosticados com lesão medular crônica (tempo de lesão superior a um ano); (b) lesões de nível cervical ou torácico, classificadas como AIS A, B, C ou D; (c) intervenção principal utilizando implante de estimulação elétrica epidural lombo-sacral; (d) avaliação de desfechos motores (recuperação de marcha, ortostatismo, controle de tronco, atividade motora voluntária abaixo do nível da lesão) ou autonômicos; e (e) publicações em idiomas inglês ou português. Foram priorizados ensaios clínicos recentes publicados no período de 2022 a 2026, bem como estudos clássicos e fundamentais da literatura (2011 a 2021) publicados em periódicos de alto impacto (e.g., *Nature*, *The Lancet*, *New England Journal of Medicine*).

Os critérios de exclusão englobaram: (a) estudos realizados exclusivamente em modelos animais sem translação para humanos; (b) revisões narrativas sem dados clínicos primários; (c) relatos de casos com lesões periféricas; e (d) estudos cujo foco principal fosse o manejo exclusivo da dor neuropática sem avaliação de desfechos motores. Adicionalmente, para a seção de comparação crítica, foram incluídos estudos que avaliaram a eficácia da estimulação transcutânea espinal em populações semelhantes.

A seleção dos estudos ocorreu em duas etapas: inicialmente, realizou-se a triagem de títulos e resumos para exclusão dos estudos que não atendiam aos critérios de elegibilidade; em seguida, procedeu-se à leitura na íntegra dos estudos selecionados para extração dos dados. A análise foi de natureza qualitativa, com foco na síntese dos mecanismos neurofisiológicos relacionados à excitabilidade espinal, nos parâmetros de estimulação e implantação, e nos desfechos motores voluntários reportados após a associação entre estimulação elétrica epidural e treinamento locomotor intensivo.

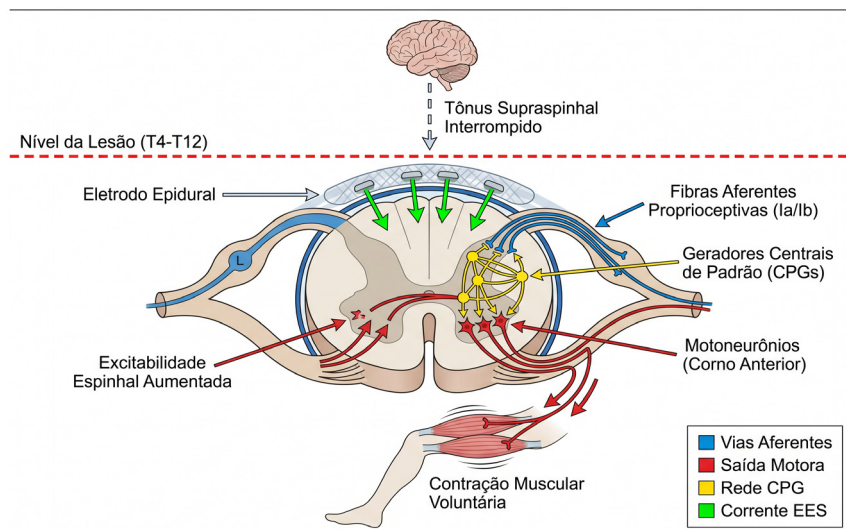
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Bases Neurofisiológicas da Estimulação Epidural

A compreensão dos mecanismos associados aos efeitos da EES fundamenta-se na neuroanatomia e na plasticidade funcional da medula espinal. Após lesões medulares severas, vias descendentes, como os tratos corticoespinal e reticuloespinal, podem apresentar interrupção significativa, reduzindo o drive excitatório necessário à ativação dos motoneurônios lombo-sacrais. Entretanto, evidências sugerem que circuitos neurais intrínsecos abaixo do nível da lesão podem permanecer estruturalmente preservados e funcionalmente moduláveis (Edgerton e Harkema, 2011; Guertin, 2013; Minassian et al., 2016). Essas redes interneuronais, incluindo os CPGs, têm sido relacionadas à organização de padrões locomotores rítmicos e podem responder à neuromodulação adequada (Barrière et al., 2008; Taccola, 2018; OuYang et al., 2025).

A EES tem sido proposta como estratégia para modular a hipoexcitabilidade funcional dos circuitos espinais abaixo da lesão. Quando os eletrodos são posicionados sobre a intumescência lombo-sacral (segmentos L1 a S1), a estimulação é descrita como capaz de recrutar predominantemente fibras aferentes proprioceptivas das raízes dorsais, incluindo fibras dos grupos Ia e Ib. Esse mecanismo pode aumentar a excitabilidade espinal e reduzir o limiar funcional de ativação de redes interneuronais e motoneurônios do corno anterior (Harkema et al., 2011; Capogrosso et al., 2016; Wagner et al., 2018). Nesse contexto, sinais descendentes residuais, potencialmente

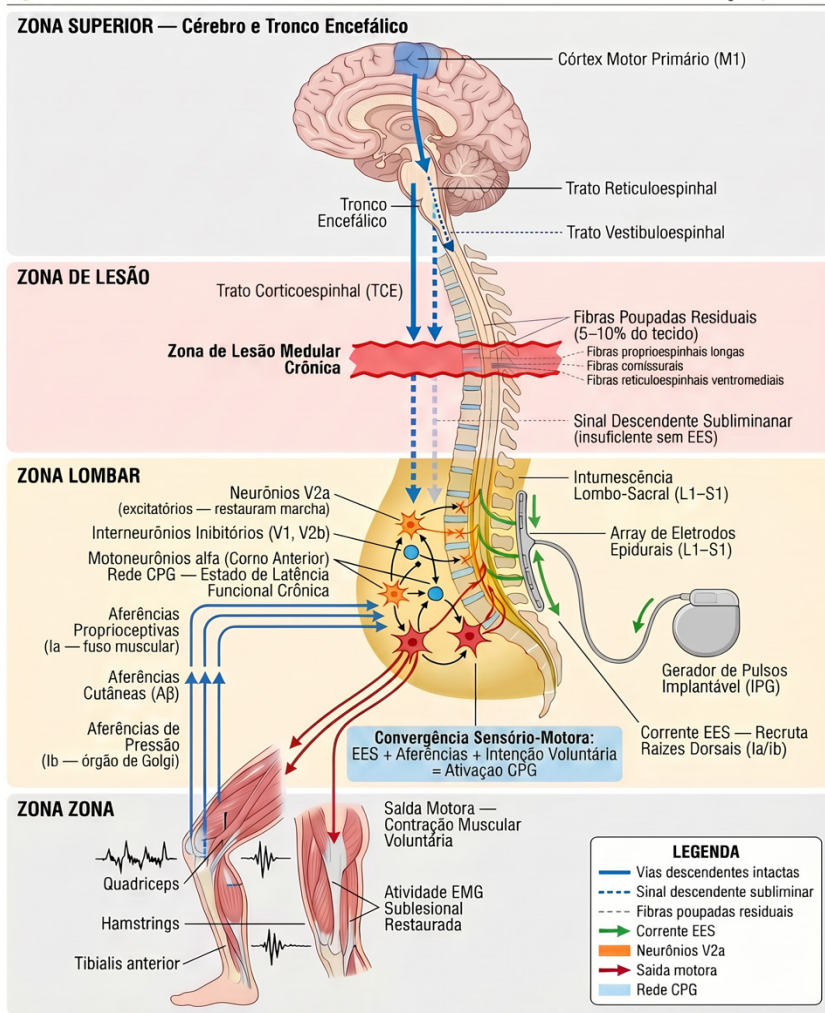
preservados mesmo em lesões clinicamente completas (AIS A), podem contribuir para desencadear respostas motoras voluntárias (Angeli et al., 2018; Kathe et al., 2022; Lorach et al., 2023).



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Harkema et al. (2011); Wagner et al. (2018); Kathe et al. (2022)

Figura 1 - Mecanismo Neurofisiológico da Estimulação Elétrica Espinal (EES)

A modulação de circuitos sublesionais por meio da EES tem sido relacionada a mecanismos de neuroplasticidade dependente da atividade. A intenção voluntária do paciente, associada ao feedback sensorial gerado durante o treinamento locomotor com suporte de peso corporal, pode favorecer a convergência de sinais excitatórios na medula espinal. Esse processo pode contribuir para o fortalecimento sináptico, descrito em modelos de plasticidade Hebbiana, e para a reorganização funcional de vias neurais remanescentes. Ao longo do processo reabilitativo, tais adaptações podem estar associadas ao refinamento do controle motor e, em alguns casos, à persistência de respostas motoras mesmo na ausência momentânea da estimulação (Gill et al., 2018; Kathe et al., 2022; Angeli et al., 2025).



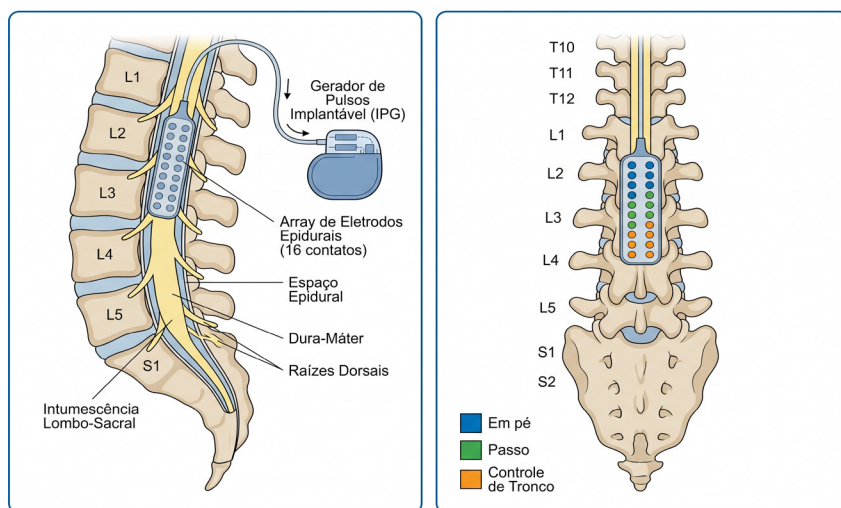
Fonte: Elaborado pelos autores com base em Edgerton e Harkema (2011); Kathe et al. (2022); Lorach et al. (2023); Capogrosso et al. (2016)

Figura 2 - Vias Neurais Remanescentes, Circuitos Sublesionais e Mecanismo de Reativação pela EES

Evidência Clínica em Humanos com Implante Epidural

A aplicação clínica da neuromodulação espinal avançou significativamente na última década, com contribuições relevantes de grupos pioneiros na área. Entre os estudos de referência, Harkema et al. (2011), desenvolvido na Universidade de Louisville, foi um dos primeiros a demonstrar que um indivíduo com paraplegia

motora crônica (AIS B) apresentou ortostatismo com sustentação do próprio peso e movimentos voluntários dos membros inferiores durante a estimulação elétrica epidural. Esses achados forneceram evidências de que circuitos localizados na intumescência lombo-sacral podem permanecer funcionalmente responsivos mesmo anos após a lesão (Harkema et al., 2011; Edgerton e Harkema, 2011).



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Harkema et al. (2011); Wagner et al. (2018); Angeli et al. (2018)

Figura 3 - Posicionamento do Implante Epidural na Intumescência Lombo-Sacral

Posicionamento do Implante Epidural na Intumescência Lombo-Sacral.

Avanços posteriores ampliaram a precisão dos protocolos de neuromodulação, incluindo estratégias de estimulação espaço-temporal direcionada. Nesse contexto, o grupo de Grégoire Courtine e colaboradores desenvolveu abordagens baseadas na aplicação de estímulos direcionados a raízes dorsais específicas, sincronizados com fases distintas da marcha. No estudo publicado por Wagner et al. (2018), indivíduos com paralisia crônica apresentaram recuperação de funções locomotoras sobre o solo e desempenho em tarefas como pedalar, associadas ao treinamento intensivo e à calibração da estimulação. Além disso, estudos mais recentes sugerem que esses efeitos podem estar relacionados à reorganização de circuitos espinhais específicos, incluindo a participação de neurônios excitatórios do tipo V2a (Kathe et al., 2022; Wagner et al., 2018; Lorach et al., 2023).

Estudo	Periódico (Ano)	N	Nível da Lesão	AIS	Tipo de EES	Desfecho Principal	Resultado Chave
Harkema et al.	The Lancet (2011)	1	C7-T1	B	Tônica (L1-S1)	Ortostatismo voluntário	Ortostatismo independente com peso total
Angeli et al.	Brain (2014)	4	C7-T1	A-B	Tônica (L1-S1)	Mov. voluntário MMII	4/4 recuperaram movimento voluntário
Gill et al.	Nature Medicine (2018)	1	T3-T4	A	Tônica (L1-S1)	Passos independentes	Passos independentes com EES ativa
Angeli et al.	NEJM (2018)	4	T4-C5	A-B	Tônica (L1-S1)	Marcha sobre o solo	2/4 marcharam independentemente
Wagner et al.	Nature (2018)	3	T3-T11	A-C	Espaço-temporal	Marcha voluntária	Marcha em 1 semana; neuroplasticidade
Kathe et al.	Nature (2022)	9	T2-T11	A-C	Espaço-temporal	Neurônios responsáveis	Neurônios V2a identificados (transcriptômica)
Lorach et al.	Nature (2023)	1	C5-C6	C	Interface cérebro-espinha	Marcha natural comunitária	Marcha em ambientes comunitários
Romeni et al.	Sci. Transl. Med. (2025)	6	T2-T12	A-B	Alta frequência	Espasticidade e marcha	Redução espasticidade + melhora marcha
Angeli et al.	J. Neuroeng. Rehab. (2025)	8	C3-C6	A-B	Tônica (cervical)	Ortostatismo cervical	Melhora significativa no ortostatismo

Tabela 1 – Principais Ensaios Clínicos com Estimulação Elétrica Epidural (EES) em Lesão Medular

Simultaneamente, estudos conduzidos por Angeli et al. (2018) relataram recuperação de funções locomotoras em indivíduos com lesão medular classificada como AIS A, após treinamento locomotor intensivo associado à estimulação elétrica epidural. Além dos desfechos relacionados à marcha e ao ortostatismo, estudos clínicos mais recentes têm ampliado o interesse sobre potenciais efeitos da EES em outros domínios funcionais, incluindo controle de tronco, regulação cardiovascular, função vesical e intestinal, bem como possíveis ganhos funcionais em membros superiores em indivíduos com lesão cervical (Gill et al., 2018; Angeli et al., 2025; Porcaban et al., 2025; Romeni et al., 2025).

Estudo (Ano)	Ortostatis- mo Inde- pendente	Marcha sobre o Solo	Controle de Tronco	Mov. Vo- luntário MMII	Função Au- tônômica	Persis- tência sem EES	Tempo de Treina- mento
Harkema et al. (2011)	Sim (4,25 min)	Não	Sim (Par- cial)	Sim (EES ativa)	Sim (PA)	Parcial	26 meses pré-im- plante
Angeli et al. (2014)	Sim (4/4)	Não	Sim	Sim (4/4)	Não	Parcial (2/4)	80 sessões
Gill et al. (2018)	Sim	Sim (Passos)	Sim	Sim	Não	Não relatado	Não re- latado
Angeli et al. (2018)	Sim (4/4)	Sim (2/4)	Sim (4/4)	Sim (4/4)	Sim (PA)	Sim (2/4)	81–278 sessões
Wagner et al. (2018)	Sim (3/3)	Sim (3/3)	Sim	Sim (3/3)	Sim (PA)	Sim (3/3)	Semanas- meses
Kathe et al. (2022)	Sim	Sim (9/9)	Sim	Sim	Sim	Sim (parcial)	Meses de reabilitação
Lorach et al. (2023)	Sim	Sim (Co- munitária)	Sim	Sim (MMSS)	Sim	Sim	> 1 ano
Romeni et al. (2025)	Sim	Sim (Me- lhorada)	Sim	Sim	Sim	Sim (Parcial)	12 semanas

Legenda: Sim = desfecho positivo relatado; Não = não avaliado; PA = pressão arterial; MMII = membros inferiores; MMSS = membros superiores.

Tabela 2 – Resultados Motores Voluntários Obtidos com EES em Pacientes com Lesão Medular Crônica

Estudo (Ano)	Nível da Lesão	Seg- mentos Alvo (EES)	Tipo de Eletrodo	Parâmetros (Hz / mA / μ s)	Função Alvo	Posição	Dispositivo Utilizado
Harkema et al. (2011)	C7-T1	L1-S1	Array 16 contatos (paddle)	25–50 Hz / 4–9 V / 210 μ s	Ortostatismo e marcha assistida	Posterior (dorsal)	Medtronic RestoreAd- vanced
Angeli et al. (2014)	C7-T1	L1-S1	Array 16 contatos (paddle)	25–40 Hz / 3–8 V / 210 μ s	Movimento voluntário MMII	Posterior (dorsal)	Medtronic RestoreAd- vanced
Gill et al. (2018)	T3-T4	L1-S1	Array 16 contatos (paddle)	25 Hz / 5–8 V / 210 μ s	Passos inde- pendentes	Posterior (dorsal)	Medtronic RestoreAd- vanced
Angeli et al. (2018)	T4-C5	L1-S1	Array 16 contatos (paddle)	25–40 Hz / 2–8 V / 210 μ s	Marcha sobre o solo	Posterior (dorsal)	Medtronic RestoreAd- vanced
Wagner et al. (2018)	T3-T11	L1-S1 (sele- tivo)	Array 16 contatos (paddle)	Espaço-tem- poral 40 Hz / 1–5 mA	Marcha voluntária	Posterior (dorsal)	Customi- zado EPFL/ ONWARD
Kathe et al. (2022)	T2-T11	L1-S1 (sele- tivo)	Array 16 contatos (paddle)	Espaço-tem- poral 40 Hz / 1–5 mA	Marcha e neuroplas- ticidade	Posterior (dorsal)	ONWARD ARC-IM

Lorach et al. (2023)	C5-C6	L1-S1 + Interface BCI	Array 16 + ECoG cortical	Adaptativo (tempo real)	Marcha natural em comunidade	Posterior (dorsal)	ONWARD ARC-IM + BCI
Romeni et al. (2025)	T2-T12	L1-S1	Array 16 contatos (paddle)	10 kHz (alta frequência)	Espasticidade e marcha	Posterior (dorsal)	Medtronic SureScan

Legenda: Hz = Hertz; mA = miliampères; μ s = microssegundos; V = Volts; BCI = Brain-Computer Interface; ECoG = Eletrocorticografia; MMII = membros inferiores.

Tabela 3 – Posicionamento dos Eletrodos Epidurais por Estudo e Função Motora Alvo

Comparação Crítica: Estimulação Epidural versus Transcutânea

Com o avanço das estratégias de neuromodulação, a estimulação transcutânea espinal (tSCS) emergiu como uma alternativa não invasiva à EES. Essa técnica utiliza eletrodos de superfície posicionados sobre a região lombo-sacral e abdominal, permitindo a aplicação de correntes elétricas capazes de modular a excitabilidade dos circuitos espinais por meio do recrutamento de aferências das raízes dorsais.

Assim como a EES, a tSCS tem demonstrado potencial para reativar redes neurais sublesionais e favorecer respostas motoras e autonômicas em indivíduos com lesão medular. Estudos recentes indicam que, quando associada à reabilitação intensiva, essa abordagem pode contribuir para redução da espasticidade, melhora do controle motor e recuperação funcional em diferentes graus (Mayr et al., 2016; Guiho et al., 2021; Shankar et al., 2025).

Embora seus efeitos sejam, em geral, menos seletivos do que os observados com a estimulação epidural implantável, a tSCS apresenta vantagens relevantes, como menor custo, ausência de procedimento cirúrgico e maior potencial de aplicabilidade clínica. Dessa forma, essa modalidade amplia as possibilidades terapêuticas no campo da neuroreabilitação e reforça o papel da neuromodulação como estratégia promissora para recuperação funcional após lesão medular.

Contudo, uma análise comparativa evidencia diferenças importantes entre a EES e a tSCS, especialmente quanto à seletividade e ao potencial terapêutico. Por estar posicionada diretamente no espaço epidural, a EES requer menores amplitudes de corrente e permite maior especificidade na modulação dos circuitos espinais, favorecendo a ativação mais direcionada de redes motoras relacionadas à extensão, flexão e coordenação locomotora (Wagner et al., 2018; Joiner et al., 2025).

Em contrapartida, a tSCS apresenta menor seletividade, em razão da dispersão da corrente pelos tecidos superficiais, o que pode limitar a precisão do recrutamento neural. Ainda assim, essa modalidade tem demonstrado benefícios clínicos relevantes,

particularmente por seu caráter não invasivo, menor custo e aplicabilidade em diferentes contextos terapêuticos (Mayr et al., 2016; Shankar et al., 2025).

De modo geral, as evidências sugerem que a EES apresenta maior potencial para modular padrões motores complexos, especialmente em protocolos voltados à recuperação locomotora em casos de lesão medular crônica. Por outro lado, a tSCS configura-se como estratégia complementar e promissora, podendo ampliar o acesso às abordagens de neuromodulação na prática clínica.

Critério	EES (Epidural)	tSCS (Transcutânea)	Vantagem Comparativa
Tipo de acesso	Cirúrgico (implante percutâneo ou paddle)	Não invasivo (eletrodos de superfície)	tSCS (menor risco cirúrgico)
Seletividade espacial	Alta – ativa raízes dorsais específicas	Baixa – dispersão de corrente tecidual	EES
Amplitude de corrente necessária	Baixa (1–10 mA)	Alta (50–200 mA)	EES (menor desconforto)
Recrutamento muscular	Seletivo e coordenado (agonistas/antagonistas)	Difuso (musculatura paravertebral superficial)	EES
Capacidade de restaurar marcha independente	Demonstrada em múltiplos ensaios clínicos (AIS A-C)	Limitada; melhora parcial em AIS C-D	EES
Controle de tronco e ortostatismo	Alta eficácia (múltiplos estudos, AIS A)	Eficácia moderada	EES
Regulação autonômica (PA, bexiga)	Demonstrada (Angeli et al., 2018; Gill et al., 2018)	Evidência emergente, limitada	EES
Custo e acessibilidade	Alto (cirurgia + dispositivo implantável)	Baixo (equipamento portátil, sem cirurgia)	tSCS
Aplicabilidade clínica ampla	Restrita (critérios cirúrgicos rigorosos)	Ampla (qualquer paciente com LM)	tSCS
Neuroplasticidade induzida	Alta – persistência após EES desligada	Moderada	EES
Referência principal	Wagner et al. (2018); Kathe et al. (2022)	Mayr et al. (2016); Shankar et al. (2025)	—

Legenda: EES = Estimulação Elétrica Epidural; tSCS = Estimulação Transcutânea Espinhal; PA = Pressão Arterial; LM = Lesão Medular.

Tabela 4 – Comparação Crítica: Estimulação Elétrica Epidural (EES) versus Estimulação Transcutânea Espinhal (tSCS)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das evidências neurofisiológicas e clínicas apresentadas neste capítulo sustenta a hipótese de que os circuitos neurais sublesionais da medula espinhal

não são necessariamente abolidos após uma lesão severa, podendo permanecer funcionalmente preservados, embora em estado de baixa excitabilidade. Nesse contexto, a EES, aplicada na intumescência lombo-sacral, tem demonstrado potencial para modular a excitabilidade espinhal e influenciar a atividade dos GCPs. Associada ao treinamento intensivo, essa abordagem pode favorecer a reativação de redes neurais remanescentes e possibilitar respostas motoras funcionais abaixo do nível da lesão.

Os objetivos propostos neste capítulo foram abordados à luz das evidências disponíveis na literatura contemporânea. Estudos clínicos demonstram que indivíduos com lesão medular crônica, anteriormente classificados com paralisia motora completa, podem apresentar recuperação de funções como ortostatismo, controle de tronco, padrões de marcha e aspectos da regulação autonômica após intervenções com estimulação elétrica epidural associada à reabilitação.

Entretanto, as evidências também indicam que a EES não atua como intervenção isolada. Seus efeitos dependem da interação com processos de neuroplasticidade, os quais são potencializados por programas de treinamento fisioterapêutico intensivo, orientado à tarefa e sustentado ao longo do tempo.

As implicações para a reabilitação neurofuncional são significativas, uma vez que a associação entre EES e treinamento locomotor intensivo tem sido progressivamente consolidada como uma abordagem promissora no manejo da lesão medular crônica. Em comparação com a estimulação transcutânea, a EES apresenta maior seletividade e capacidade de modulação dos circuitos espinais, o que favorece a organização de padrões motores mais complexos em determinados contextos clínicos.

As perspectivas futuras incluem o desenvolvimento de interfaces cérebro-espinha (brain-spine interfaces) e sistemas de estimulação em malha fechada (closed-loop), com integração de algoritmos computacionais capazes de interpretar sinais neurais e ajustar a estimulação em tempo real. Esses avanços podem ampliar a precisão das intervenções e contribuir para novos patamares de recuperação funcional em indivíduos com lesão medular crônica.

REFERÊNCIAS

ANGELI, C. A. et al. Activity-based recovery training with spinal cord epidural stimulation improves standing performance in cervical spinal cord injury. **Journal of Neuroengineering and Rehabilitation**, v. 22, 2025.

ANGELI, C. A. et al. Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans. **Brain**, v. 137, n. 5, p. 1394-1409, 2014. DOI: 10.1093/brain/awu038.

ANGELI, C. A. et al. Recovery of over-ground walking after chronic motor complete spinal cord injury. **New England Journal of Medicine**, v. 379, n. 13, p. 1244-1250, 2018. DOI: 10.1056/NEJMoa1803588.

BARRIÈRE, G. et al. Prominent Role of the Spinal Central Pattern Generator in the Recovery of Locomotion after Partial Spinal Cord Injuries. **Journal of Neuroscience**, v. 28, n. 15, p. 3976-3987, 2008. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5692-07.2008.

CAPOGROSSO, M. et al. A brain-spine interface alleviating gait deficits after spinal cord injury in primates. **Nature**, v. 539, p. 284-288, 2016. DOI: 10.1038/nature20118.

EDGERTON, V. R.; HARKEMA, S. J. Epidural stimulation of the spinal cord in spinal cord injury: current status and future challenges. **Expert Review of Neurotherapeutics**, v. 11, n. 10, p. 1351-1353, 2011. DOI: 10.1586/ern.11.129.

GILL, M. L. et al. Neuromodulation of lumbosacral spinal networks enables independent stepping after complete paraplegia. **Nature Medicine**, v. 24, p. 1677-1682, 2018. DOI: 10.1038/s41591-018-0175-7.

GUERTIN, P. A. Central Pattern Generator for Locomotion: anatomical, physiological, and pathophysiological considerations. **Frontiers in Neurology**, v. 3, n. 183, 2013. DOI: 10.3389/fneur.2012.00183.

GUIHO, T. et al. Epidural and transcutaneous spinal cord stimulation facilitates motor recovery after spinal cord injury. **Current Opinion in Neurology**, v. 34, n. 4, p. 574-581, 2021. DOI: 10.1097/WCO.0000000000000948.

HARKEMA, S. J. et al. Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study. **The Lancet**, v. 377, n. 9781, p. 1938-1947, 2011. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)60547-3.

JOINER, E. F. et al. Comparison of epidural and transcutaneous spinal cord stimulation for targeted motor recovery. **Neuromodulation: Technology at the Neural Interface**, v. 28, 2025. DOI: 10.1016/j.neurom.2025.01.003.

KATHE, C. et al. The neurons that restore walking after paralysis. **Nature**, v. 611, p. 540-547, 2022. DOI: 10.1038/s41586-022-05385-7.

LORACH, H. et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface. **Nature**, v. 618, p. 126-133, 2023. DOI: 10.1038/s41586-023-06094-5.

MAYR, W. et al. Epidural and transcutaneous spinal electrical stimulation for modification of spinal motor output. **European Journal of Translational Myology**, v. 26, n. 3, p. 6133, 2016. DOI: 10.4081/ejtm.2016.6133.

MINASSIAN, K. et al. Targeting lumbar spinal neural circuitry by epidural stimulation to restore motor function after spinal cord injury. **Neurotherapeutics**, v. 13, p. 284-294, 2016. DOI: 10.1007/s13311-016-0421-y.

OUYANG, Z. Q. et al. Hotspots and Trends in Spinal Cord Stimulation Research for Spinal Cord Injury: A Bibliometric Analysis with Emphasis on Motor Recovery (2014–2024). **World Neurosurgery**, v. 194, p. 123456, 2025. DOI: 10.1016/j.wneu.2025.01.088.

PORCEBAN, M. M. et al. Time Course of Motor Improvement by Epidural Stimulation in Spinal Cord Injury. **Spinal Cord**, v. 63, p. 45-52, 2025. DOI: 10.1038/s41393-025-00987-3.

ROMENI, S. et al. High-frequency epidural electrical stimulation reduces spasticity and facilitates walking recovery in patients with spinal cord injury. **Science Translational Medicine**, v. 17, n. 789, 2025. DOI: 10.1126/scitranslmed.adp9607.

SHANKAR, R. et al. Effectiveness of Transcutaneous Spinal Cord Stimulation for Motor Recovery and Walking. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, v. 106, n. 3, p. 412-421, 2025. DOI: 10.1016/j.apmr.2024.11.012.

TACCOLA, G. et al. Recovery of volitional control of movement after spinal cord injury: the role of spinal cord stimulation and neuroplasticity. **Journal of Neuroscience Research**, v. 96, n. 4, p. 539-553, 2018. DOI: 10.1002/jnr.24064.

WAGNER, F. B. et al. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. **Nature**, v. 563, p. 65-71, 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0649-2.