



DOI: 10.14295/idonline.v19i79.4331

Artigo de Revisão

Estímulos a Partir de Ondas Eletromagnéticas no CórTEX-Pré-Frontal do Cérebro

*Edcleyton de Alencar Ventura¹; Rodrigo de Souza Lacerda²;
Samuel Delmondes Guimarães³; Vinícius Delmondes de Souza Cruz⁴*

Resumo: O córtex pré-frontal possui um papel essencial em funções cognitivas superiores, como a tomada de decisão, controle inibitório, atenção e regulação das emoções. Dessa forma, nos últimos anos, técnicas de estimulação pautadas em ondas eletromagnéticas vêm sendo amplamente analisadas como estratégias não invasivas para modular a atividade neuronal dessa região cortical. Sob essa ótica, métodos como a estimulação magnética transcraniana e a estimulação transcraniana por corrente alternada ou contínua fazem uso de campos eletromagnéticos para estimular alterações na excitabilidade cortical, viabilizando reorganizações funcionais tanto temporárias quanto duradouras. Assim, esse estudo tem objetivo geral identificar os efeitos da estimulação por ondas eletromagnéticas no córtex pré-frontal, com ênfase em seus impactos sobre processos cognitivos e comportamentais, assim como também o seu potencial terapêutico em cenários clínicos e experimentais. Para a realização do estudo, optou-se por fazer uso da metodologia de pesquisa bibliográfica, a qual consiste em uma revisão da literatura, com seleção de estudos publicados em bases de dados científicas nacionais e internacionais, como PubMed, Scopus e Web of Science. Dito isso, como possíveis resultados, foi possível identificar evidências de que a estimulação eletromagnética do córtex pré-frontal pode otimizar funções executivas, atenção e memória de trabalho, além de apresentar efeitos promissores no tratamento de transtornos como a depressão, ansiedade e déficit de atenção. Além disso, os achados contribuirão para o melhoramento de protocolos de estimulação e para o avanço de intervenções neuroterapêuticas fundamentadas em neuromodulação não invasiva.

Palavras-Chave: córtex pré-frontal; estimulação magnética; intervenções neuroterapêuticas.

Stimulation from Electromagnetic Waves in the Prefrontal Cortex of the Brain

Abstract: The prefrontal cortex plays an essential role in higher cognitive functions, such as decision-making, inhibitory control, attention, and emotional regulation. In recent years, stimulation techniques based on electromagnetic waves have been widely investigated as non-invasive strategies to modulate neuronal activity in this cortical region. From this perspective, methods such as transcranial magnetic stimulation and transcranial alternating or direct current stimulation use electromagnetic fields to

¹ Técnico em Radiologia pela FESN – Centro Educacional. E-mail: edclleyton@gmail.com;

² Graduado em Ciências Contábeis pela Faculdade de Ciências Humanas e Sociais de Araripina (FACISA). Especialista em Gestão em Organizações do Terceiro Setor e Projetos Sociais em Gestão Pública pela Universidade Norte do Paraná – UNOPAR. Especialista em Docência do Ensino Superior pela AEDA e especialista em Controladoria e Finanças pelo Centro Universitário Internacional - UNINTER. E-mail: rodrigoslacerda.cont@gmail.com;

³ Técnico em Radiologia pela FESN – Centro Educacional. E-mail: samueldelmondes84@gmail.com;

⁴ Técnico em Radiologia pela FESN – Centro Educacional. E-mail: viniciusdelmondes4824@gmail.com.

promote changes in cortical excitability, enabling both temporary and long-lasting functional reorganizations. Thus, the general objective of this study is to identify the effects of electromagnetic wave stimulation on the prefrontal cortex, with an emphasis on its impacts on cognitive and behavioral processes, as well as its therapeutic potential in clinical and experimental settings. For the development of this study, a bibliographic research methodology was adopted, consisting of a literature review with the selection of studies published in national and international scientific databases, such as PubMed, Scopus, and Web of Science. In this regard, possible results indicate evidence that electromagnetic stimulation of the prefrontal cortex can enhance executive functions, attention, and working memory, in addition to showing promising effects in the treatment of disorders such as depression, anxiety, and attention deficit. Furthermore, the findings may contribute to the improvement of stimulation protocols and to the advancement of neurotherapeutic interventions grounded in non-invasive neuromodulation.

Keywords: prefrontal cortex; magnetic stimulation; neurotherapeutic interventions.

Introdução

As ondas eletromagnéticas são fenômenos físico-naturais decorrentes da interação entre campos elétricos e magnéticos variáveis, que se propagam de forma perpendicular entre si e à direção do deslocamento. Estudos clássicos realizados por Jackson (1998) descrevem a natureza matemática e física dessas ondas, enquanto pesquisas atuais, como as de Iskander (2013), exploram sua interação com materiais biológicos e inorgânicos, demonstrando como frequência, intensidade e modo de aplicação podem causar efeitos diferentes em estruturas fisiológicas. No contexto biológico, essas propriedades despertam um interesse crescente, sobretudo pela possibilidade de fazer uso de estímulos eletromagnéticos aplicados de maneira controlada sobre regiões específicas do cérebro, como o córtex pré-frontal.

De uma maneira geral, o córtex pré-frontal, localizado no lobo frontal, constitui uma das áreas mais complexas e essenciais do sistema nervoso central. Estudos pioneiros acerca da estimulação cerebral não invasiva, como o de Barker, Jalinous e Freeston (1985), evidenciaram a viabilidade de modular a atividade cortical por meio de campos magnéticos, o que influenciou de forma direta em pesquisas posteriores. Pascual-Leone et al. (1999), investigou os efeitos da neuromodulação sobre funções executivas e emocionais relacionadas ao córtex pré-frontal. Dessa forma, é perceptível que essas contribuições reforçam o potencial terapêutico das técnicas de neuromodulação e justificam o interesse constante na aplicação de ondas eletromagnéticas em intervenções clínicas.

Diante desse contexto, com o aumento contínuo de doenças neuropsicológicas na sociedade contemporânea, é notória a necessidade de tratamentos cada vez mais eficazes,

seguros e não invasivos. Em muitos casos, terapias tradicionais acabam gerando desconfortos adicionais, agravando sintomas ou até desencadeando experiências traumáticas. Nesse cenário, a estimulação cerebral por ondas eletromagnéticas surge como alternativa promissora, uma vez que oferece intervenção não invasiva, com risco reduzido e resultados positivos demonstrado em diferentes estudos clínicos e experimentais.

Sendo assim, esse estudo tem como objetivo geral investigar alternativas terapêuticas neurológicas menos invasivas a partir da aplicação de estímulos eletromagnéticos, levando em consideração as tecnologias disponíveis na atualidade. Entre os objetivos específicos, se pode citar: analisar tratamentos baseados no uso de ondas eletromagnéticas; observar os efeitos gerados no cérebro por diferentes tecnologias; e fomentar o estudo da interação entre o tecido neural e estímulos eletromagnéticos.

Dito isso, a escolha do tema pode ser justificada devido ao cenário social contemporâneo, marcado pelo avanço tecnológico, pela intensificação da globalização e pelas diversas transformações decorrentes da quarta revolução industrial. Assim, é visível que a automação crescente, a competitividade e a precarização de condições laborais contribuem diretamente para o aumento de transtornos psicológicos, afetando o bem-estar individual e coletivo. Esses fatores desencadeiam impactos em cadeia, alterando comportamentos, relações interpessoais e desempenho profissional. Assim, torna-se indispensável investigar tratamentos neurológicos de alta eficácia e mínima invasão entre os quais a neuromodulação por ondas eletromagnéticas cresce como alternativa relevante e conforme às demandas atuais de saúde mental.

O presente trabalho fundamenta-se em teses, artigos científicos e produções acadêmicas voltadas para tratamentos psíquicos alternativos. A metodologia usada é bibliográfica e exploratória, tendo como base materiais disponíveis em plataformas digitais e acervos científicos.

Conceito de ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são definidas como oscilações acopladas dos campos elétrico e magnético que se propagam no espaço transportando energia, podendo atravessar tanto o vácuo quanto meios materiais. Diferentemente das ondas mecânicas, como as ondas sonoras, não necessitam de um meio material para sua propagação, uma vez que constituem fenômenos

físicos decorrentes da variação temporal dos campos elétricos e magnéticos. No vácuo, propagam-se à velocidade da luz, aproximadamente $3,0 \times 10^8$ m/s, mantendo essa velocidade constante independentemente da frequência.

Essas ondas apresentam propriedades ondulatórias clássicas, como reflexão, refração, absorção, difração, interferência, espalhamento e polarização. Quando atravessam meios materiais, como o ar ou a água, ocorre redução da velocidade de propagação e alteração do comprimento de onda, enquanto a frequência permanece constante, fenômeno caracterizado como refração.

A fundamentação teórica das ondas eletromagnéticas foi estabelecida por James Clerk Maxwell, em 1865, ao unificar as leis da eletricidade e do magnetismo por meio de um conjunto de equações que descrevem a geração e a propagação dos campos eletromagnéticos. Essas equações demonstram que os campos elétrico e magnético oscilam de forma perpendicular entre si e à direção de propagação da onda, configurando um fenômeno tridimensional de natureza transversal (Maxwell, 1865).

Tipos de ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas diferenciam-se principalmente em função de sua frequência e comprimento de onda, compondo o denominado espectro eletromagnético. Esse espectro abrange desde ondas de baixa frequência, como as ondas de rádio, até ondas de alta frequência e elevado conteúdo energético, como os raios gama (Halliday; Resnick; Walker, 2016).

As ondas de baixa frequência, que incluem as ondas de rádio e as micro-ondas, apresentam maior comprimento de onda e menor energia. Essas características permitem sua interação com tecidos biológicos sem provocar ionização celular, o que viabiliza aplicações seguras em telecomunicações, medicina e, especialmente, em técnicas de neuromodulação. Estudos demonstram que campos eletromagnéticos nessa faixa de frequência podem influenciar a atividade neuronal, sendo explorados em métodos de estimulação cerebral não invasiva (Polk; Postow, 1996).

Na região intermediária do espectro encontram-se as ondas infravermelhas, a luz visível e a radiação ultravioleta. A luz visível corresponde à faixa perceptível pelo sistema visual humano, enquanto o infravermelho está associado, sobretudo, à transferência de energia térmica. Embora essas ondas apresentem aplicações relevantes na medicina diagnóstica e

terapêutica, apenas faixas específicas vêm sendo investigadas no contexto da neuromodulação, especialmente em abordagens experimentais baseadas em estimulação fotônica (Bear; Connors; Paradiso, 2020).

As ondas de alta frequência, como os raios X e os raios gama, possuem elevado poder energético e são classificadas como radiações ionizantes, uma vez que têm capacidade de promover alterações estruturais nas células. Por esse motivo, sua utilização restringe-se a procedimentos diagnósticos e terapêuticos rigorosamente controlados. Em contraste, técnicas como a Estimulação Magnética Transcraniana utilizam campos eletromagnéticos pulsados de baixa frequência, capazes de induzir correntes elétricas no córtex cerebral de maneira segura e não invasiva, conforme amplamente descrito na literatura neurocientífica (Rossi et al., 2009; Rossini et al., 2015).

Ondas eletromagnéticas como ferramenta terapêutica

A aplicação dos princípios da física à medicina representa um marco fundamental no avanço das ciências da saúde. Historicamente, essa integração teve início com observações anatômicas e biomecânicas, como as realizadas por Leonardo da Vinci, e evoluiu para o desenvolvimento de tecnologias capazes de promover diagnósticos mais precisos, tratamentos eficazes e aumento da expectativa e qualidade de vida, consolidando a física médica como área essencial no cuidado em saúde (Hendee; Ritenour, 2002).

No campo diagnóstico, diversos métodos baseiam-se no uso de ondas, como a ultrassonografia, que emprega ondas sonoras de alta frequência para a obtenção de imagens em tempo real de órgãos e tecidos, sendo amplamente utilizada, por exemplo, no acompanhamento gestacional e na avaliação de estruturas musculoesqueléticas, devido à sua segurança e caráter não invasivo (Bushberg et al., 2012).

No âmbito terapêutico, destaca-se o uso de campos eletromagnéticos no tratamento e reabilitação de condições musculoesqueléticas. A terapia por campos eletromagnéticos configura-se como um método não invasivo, amplamente empregado para o alívio da dor, redução de processos inflamatórios e reabilitação funcional. Evidências científicas indicam que essa modalidade pode contribuir significativamente para a melhora da dor e da capacidade funcional em pacientes com distúrbios osteomusculares, impactando positivamente a qualidade de vida e a retomada das atividades diárias (Paolucci et al., 2020; Markov, 2007).

Nesse contexto, a magnetoterapia e outras modalidades baseadas em campos eletromagnéticos pulsados (PEMF – *Pulsed Electromagnetic Fields*) têm apresentado crescente aplicação clínica. Campos magnéticos de frequência extremamente baixa (ELF), geralmente na faixa de microtesla a militesla, são utilizados com o objetivo de favorecer a regeneração tecidual, modular processos inflamatórios e influenciar mecanismos celulares relacionados à neurotransmissão e à reparação tecidual, ampliando as possibilidades terapêuticas não invasivas na área da reabilitação (Bassett, 1984; Paolucci et al., 2020).

Principais tratamentos baseados em ondas eletromagnéticas

O avanço das pesquisas científicas demonstrou que as ondas elétricas, magnéticas e eletromagnéticas possuem aplicações consolidadas não apenas no campo da física, mas também nas áreas da medicina e da fisioterapia. Embora ainda existam lacunas quanto à compreensão completa de seus mecanismos de ação biológicos, diversas terapias baseadas nesses princípios encontram-se amplamente difundidas no contexto da saúde, com evidências crescentes de eficácia clínica em diferentes condições neurológicas, psiquiátricas e musculoesqueléticas (Markov, 2007; Bushberg et al., 2012).

Na neurologia e na psiquiatria, destaca-se a Estimulação Magnética Transcraniana (EMT), técnica não invasiva amplamente utilizada no tratamento de transtornos psiquiátricos, como depressão maior, transtornos de ansiedade e transtorno obsessivo-compulsivo. Seu princípio baseia-se na aplicação de campos magnéticos variáveis capazes de induzir correntes elétricas em regiões específicas do córtex cerebral, especialmente no córtex pré-frontal, promovendo a neuromodulação da atividade neuronal. Dependendo dos parâmetros utilizados, a EMT pode exercer efeitos excitatórios ou inibitórios sobre a atividade cortical, sendo ajustada conforme o quadro clínico do paciente (George et al., 2010; Lefaucheur et al., 2020).

A Estimulação Magnética Transcraniana Profunda (*Deep TMS*) constitui uma variação da EMT convencional, utilizando bobinas específicas que permitem atingir estruturas cerebrais mais profundas, ampliando o alcance terapêutico da técnica, especialmente em casos de depressão resistente e outros transtornos psiquiátricos refratários (Roth et al., 2007).

Ainda nesse campo, a eletroconvulsoterapia (ECT) representa outra modalidade terapêutica baseada na aplicação controlada de estímulos elétricos. Por meio da administração de correntes elétricas no couro cabeludo, induz-se uma convulsão terapêutica breve e

controlada, realizada sob anestesia geral e monitoramento médico rigoroso. A ECT permanece indicada para quadros psiquiátricos graves e refratários ao tratamento farmacológico, como depressão maior resistente, catatonia e alguns transtornos psicóticos, apresentando elevada eficácia clínica quando bem indicada (UK ECT Review Group, 2003; APA, 2010).

Na fisioterapia e na reabilitação, destacam-se a diatermia por ondas curtas ou micro-ondas e os campos eletromagnéticos pulsados (PEMF). A diatermia baseia-se na conversão da energia eletromagnética em calor nos tecidos profundos, promovendo vasodilatação, analgesia, relaxamento muscular e aceleração dos processos de reparação tecidual, sendo amplamente utilizada no manejo de afecções musculoesqueléticas (Kitchen; Bazin, 1996).

Os campos eletromagnéticos pulsados (PEMF), por sua vez, atuam predominantemente por mecanismos não térmicos, influenciando processos celulares relacionados à regeneração tecidual, modulação inflamatória e alívio da dor. Essa modalidade tem sido aplicada no tratamento de inflamações, lesões musculares, distúrbios circulatórios e dor crônica, com evidências favoráveis em estudos clínicos e revisões sistemáticas (Bassett, 1984; Paolucci et al., 2020).

Adicionalmente, no campo diagnóstico, os raios X constituem uma das aplicações mais relevantes das ondas eletromagnéticas na medicina moderna. A produção dessa radiação ocorre a partir de interações energéticas no interior da ampola de raios X, permitindo a obtenção de imagens internas do corpo humano por meio da interação diferencial da radiação com os tecidos. Essa tecnologia possibilita diagnósticos precisos e rápidos, sendo fundamental na prática clínica e hospitalar (Bushberg et al., 2012; Hendee; Ritenour, 2002).

Fundamentos físicos das ondas eletromagnéticas aplicadas à saúde

As ondas eletromagnéticas são descritas classicamente pelas equações de Maxwell, que integram eletricidade e magnetismo como fenômenos físicos propagáveis no espaço sob a forma de campos oscilantes. A interação dessas ondas com tecidos biológicos depende de parâmetros como frequência, comprimento de onda e intensidade, os quais determinam os efeitos fisiológicos observados.

No contexto das neurociências, essas propriedades são particularmente relevantes, uma vez que a atividade cerebral é essencialmente eletroquímica, baseada em potenciais elétricos e

correntes iônicas. Dessa forma, campos eletromagnéticos externos podem interferir de maneira controlada na excitabilidade neuronal (Halliday; Resnick; Walker, 2014).

A aplicação das ondas eletromagnéticas ao sistema nervoso central tornou-se mais evidente com o desenvolvimento da Estimulação Magnética Transcraniana, introduzida por Barker, Jalinous e Freeston em 1985. Essa técnica fundamenta-se no princípio da indução eletromagnética descrito por Faraday, segundo o qual um campo magnético variável induz correntes elétricas em meios condutores, como o tecido cerebral.

Sob a perspectiva do bioeletromagnetismo, Adey (1993) destaca que sistemas biológicos apresentam janelas específicas de sensibilidade aos campos eletromagnéticos, nas quais baixas intensidades podem produzir efeitos significativos, especialmente em tecidos altamente organizados, como o cérebro. Esses efeitos não se restringem a mecanismos térmicos, envolvendo também alterações na comunicação sináptica e na dinâmica dos potenciais de ação, sustentando o uso terapêutico e investigativo dessas tecnologias no córtex pré-frontal.

Mecanismos neurofisiológicos da estimulação eletromagnética cerebral

As ondas cerebrais correspondem a oscilações elétricas resultantes da atividade sináptica neuronal no sistema nervoso central, sendo usualmente mensuradas em hertz (Hz). Essas oscilações são classificadas, de modo geral, em cinco faixas principais: delta, theta, alfa, beta e gama, cada uma associada a diferentes estados funcionais do cérebro, como sono profundo, relaxamento, atenção, cognição e estados emocionais específicos. Tais padrões eletrofisiológicos relacionam-se diretamente a processos cognitivos, emocionais e comportamentais, bem como a condições patológicas e estados meditativos (Caimar, 2021).

O cérebro humano desempenha a função de controle e integração das atividades corporais por meio de redes neuronais altamente especializadas. Os neurônios comunicam-se entre si e com outras estruturas do organismo por meio de impulsos elétricos e sinais químicos, possibilitando a transmissão de informações e a execução de respostas motoras, sensoriais e autonômicas. Esse sistema eletroquímico constitui a base fisiológica para a modulação cerebral por estímulos externos, incluindo aqueles de natureza eletromagnética.

Conforme afirmam Ekhtiari et al., (2019) utilização de pulsos eletromagnéticos direcionados ao crânio para estimular regiões cerebrais específicas é denominada estimulação transcraniana. Essa técnica baseia-se na geração de campos magnéticos de intensidade

suficiente para induzir correntes elétricas no tecido cortical subjacente, capazes de alterar padrões de excitabilidade neuronal e produzir novos estímulos funcionais. A depender dos parâmetros de aplicação, como intensidade, frequência e localização, é possível obter diferentes respostas neurofisiológicas, permitindo a mensuração da excitabilidade cortical e a indução de alterações mapeáveis na atividade cerebral.

No caso da estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC), não ocorre ativação neuronal direta. O efeito principal consiste na modulação da excitabilidade cortical por meio de diferenças de potencial elétrico, as quais dependem da polaridade aplicada aos eletrodos. Dessa forma, a ETCC pode facilitar ou inibir a atividade neuronal, influenciando a probabilidade de disparo dos neurônios sem gerar potenciais de ação de forma imediata (Bindman et al., 1964).

Em contraste com a estimulação magnética transcraniana (EMT), a estimulação elétrica transcraniana (ETT) envolve a aplicação de correntes elétricas de baixa intensidade por meio de eletrodos posicionados no couro cabeludo. Os paradigmas mais utilizados incluem a ETCC e a estimulação transcraniana por corrente alternada (ETCA). Em protocolos convencionais, empregam-se intensidades de até 2 mA, com duração máxima de 30 minutos, consideradas seguras com base em evidências comportamentais e de neuroimagem, tanto em humanos quanto em modelos animais (Ekhtiari et al., 2019).

Alterações na atividade neuronal e na plasticidade cerebral

Inicialmente, as técnicas de estimulação transcraniana enfrentaram limitações relacionadas à duração das sessões, aos intervalos entre aplicações e ao posicionamento adequado das bobinas emissoras dos campos eletromagnéticos. Protocolos iniciais utilizavam sessões de aproximadamente uma hora diária, realizadas durante dias úteis ao longo de um mês. Com o avanço das pesquisas e a necessidade de otimização dos resultados clínicos, novos protocolos passaram a ser desenvolvidos, reduzindo significativamente o tempo de aplicação por sessão.

A partir do ano de 2018, observaram-se variações importantes nos parâmetros temporais, com sessões reduzidas para poucos minutos. Em 2021, pesquisadores da Universidade de Stanford publicaram um estudo de grande impacto ao propor um protocolo intensivo, com múltiplas sessões diárias, podendo chegar a dez aplicações por dia, com

intervalos de uma hora associadas ao uso de técnicas de neuroimagem ao longo de cinco dias. Esse método ficou conhecido como *Stanford Neuromodulation Therapy* (SNT) e representou um avanço significativo na modulação da plasticidade cerebral.

O procedimento da EMT envolve o uso de uma bobina conectada a um capacitor eletricamente carregado. Quando o circuito é acionado, ocorre a liberação de um pulso elétrico de alta intensidade, que pode atingir até 5.000 amperes, percorrendo a bobina por um intervalo extremamente curto. Essa rápida variação da corrente elétrica gera um campo eletromagnético cujas linhas de fluxo estão diretamente associadas à geometria da bobina. A intensidade do campo magnético depende da qualidade do equipamento, podendo variar entre 1 e 2,5 teslas, com pico máximo em torno de 100 microssegundos, seguido de rápido decaimento.

No córtex cerebral, os principais meios condutores são estruturas neurais orientadas aproximadamente de forma paralela à bobina, localizadas a uma profundidade média de 1,5 a 2 cm abaixo da superfície do couro cabeludo. O campo elétrico induzido no tecido cerebral é da ordem de 100 mV/mm, sendo que maiores intensidades estão associadas a uma maior extensão da despolarização das membranas celulares e, consequentemente, a uma área ampliada de ativação neuronal. Ademais, devido à elevada resistência elétrica do couro cabeludo e do crânio, a corrente que flui nessas estruturas é mínima, reduzindo o desconforto decorrente da ativação de terminações nociceptivas (Conforto et al., 2003).

Efeitos terapêuticos e comportamentais observados em humanos

As ondas eletromagnéticas fazem parte do cotidiano humano; contudo, ainda existem concepções equivocadas e estigmas associados ao seu uso clínico, frequentemente reforçados por informações imprecisas e pela associação indevida com efeitos nocivos generalizados. Nesse contexto, torna-se necessário desmistificar a aplicação terapêutica desses estímulos, destacando seus benefícios quando empregados de forma controlada e fundamentada cientificamente, como ocorre nas sessões de estimulação magnética transcraniana (EMT), técnica reconhecida por órgãos reguladores e diretrizes internacionais (Lefaucheur et al., 2020; George; Post, 2011).

As sessões de EMT são realizadas em clínicas especializadas em neuromodulação, sob supervisão de profissionais habilitados, geralmente médicos neurologistas ou psiquiatras. Durante o procedimento, o paciente é posicionado de maneira confortável, podendo permanecer

sentado ou deitado, enquanto a bobina responsável pela emissão dos pulsos eletromagnéticos é adequadamente posicionada sobre o couro cabeludo, de acordo com a região cerebral alvo do tratamento, com destaque para o córtex pré-frontal dorsolateral em protocolos voltados a transtornos do humor (Rossi et al., 2009; Lefaucheur et al., 2020).

Os efeitos terapêuticos da EMT têm sido amplamente investigados em diferentes transtornos e síndromes, com finalidades específicas, embora baseadas em um mesmo princípio de modulação da excitabilidade cortical. Entre as principais condições tratadas destacam-se o transtorno de ansiedade, a depressão maior, o transtorno obsessivo-compulsivo e a cessação do tabagismo. Estudos clínicos e revisões sistemáticas relatam taxas de resposta clínica superiores a 50% em pacientes com depressão resistente ao tratamento farmacológico, quando comparados ao estado inicial ou a grupos controle, evidenciando a eficácia do método em diversos quadros psiquiátricos (George et al., 2010; Berlim; Van den Eynde; Daskalakis, 2013).

Além da redução dos sintomas emocionais, benefícios adicionais têm sido descritos, incluindo diminuição da tensão psíquica e das preocupações excessivas, melhora da qualidade do sono e aprimoramento de funções cognitivas, como atenção, memória de trabalho e concentração. Embora a EMT possa apresentar efeitos colaterais, estes são geralmente leves e transitórios, sendo os mais comuns cefaleia leve, tontura passageira e desconforto local no couro cabeludo durante a aplicação, o que reforça o perfil de segurança da técnica quando aplicada conforme protocolos clínicos estabelecidos (Rossi et al., 2009; George; Post, 2011).

Possíveis efeitos adversos e implicações éticas do uso clínico

O principal efeito adverso associado à EMT é a ocorrência de convulsões accidentais, especialmente quando são utilizadas frequências próximas ou superiores a 60 Hz, capazes de atingir o limiar convulsivo em indivíduos suscetíveis. Embora a maioria dos equipamentos clínicos não opere rotineiramente nessas frequências, é imprescindível que o profissional responsável siga rigorosamente os protocolos de segurança e realize uma anamnese detalhada antes do início do tratamento.

Segundo George e Belmaker, há grupos populacionais com maior risco de convulsões induzidas, incluindo: indivíduos com encefalopatias focais ou generalizadas, como tumores, acidente vascular cerebral, meningite ou encefalite; pessoas com epilepsia não tratada; indivíduos com histórico familiar de epilepsia idiopática; pacientes que iniciaram recentemente o uso de medicamentos que reduzem o limiar convulsivo; usuários de álcool em consumo

elevado ou em abstinência abrupta, bem como de drogas epileptogênicas; e indivíduos com doenças cardíacas graves ou aumento da pressão intracraniana, que apresentam maior risco de sequelas em caso de crises convulsivas (Rosa et al., 2004).

Dessa forma, além dos aspectos técnicos, o uso clínico da EMT envolve implicações éticas relevantes, como a adequada seleção dos pacientes, o consentimento informado e a avaliação criteriosa da relação risco-benefício. O respeito a esses princípios é fundamental para garantir a segurança, a eficácia e a legitimidade do uso terapêutico da estimulação eletromagnética no contexto da saúde humana.

Propriedades biofísicas do tecido neural e sua resposta aos campos eletromagnéticos

O tecido neural possui propriedades biofísicas específicas relacionadas à sua composição estrutural e funcional, como a elevada condutividade elétrica, permissividade dielétrica variável e forte dependência da organização celular e da mielinização. É possível dizer que essas propriedades são resultado da presença de membranas lipídicas, canais iônicos e do meio extracelular rico em eletrólitos, o que torna o tecido neural particularmente sensível a estímulos elétricos e magnéticos. Estudos recentes destacam que a condutividade e a permissividade do tecido cerebral variam de acordo com a frequência do campo aplicado e o estado fisiológico do tecido, sendo essenciais para o entendimento da interação entre campos eletromagnéticos e o sistema nervoso (Porter et al., 2024).

Ademais, o comportamento do tecido neural aos campos eletromagnéticos ocorre principalmente através da indução de campos elétricos locais capazes de modular o potencial de membrana dos neurônios. Em técnicas de neuromodulação não invasiva, como a estimulação magnética transcraniana, esses campos induzidos podem vir a modificar a excitabilidade cortical, influenciando o disparo neuronal e a comunicação sináptica. Além do mais, estudos atuais indicam que esses estímulos podem vir a afetar não apenas neurônios, mas também células gliais, promovendo mudanças na plasticidade sináptica e na regulação homeostática do sistema nervoso central (Wang et al., 2024).

Sob a perspectiva celular, fatores como exposição a campos eletromagnéticos podem desencadear efeitos excitatórios ou inibitórios, a depender da intensidade, frequência e padrão temporal do estímulo. Assim, fenômenos conhecidos como carry-over effects confirmam que alterações na atividade neuronal podem persistir após o término da estimulação, possivelmente

associadas a mudanças na dinâmica dos canais iônicos e nos mecanismos de plasticidade sináptica. Esses efeitos dependentes do estado funcional do tecido reforçam a complexidade da resposta neural aos campos eletromagnéticos e a necessidade de modelos biofísicos integrativos (Ye et al., 2024).

Em síntese, a compreensão correta dessas interações necessita do uso de modelagem computacional e estudos dosimétricos que levem em consideração a heterogeneidade e anisotropia do tecido cerebral. Pesquisas recentes corroboram com a ideia de que a integração entre dados experimentais, modelos anatômicos realistas e parâmetros biofísicos confiáveis é indispensável para garantir tanto a segurança quanto a eficácia das aplicações clínicas e experimentais relacionados aos campos eletromagnéticos no sistema nervoso central (Chen et al., 2024; Eskandani et al., 2023).

Processos celulares e moleculares envolvidos na interação eletromagnética

A relação entre ondas eletromagnéticas e o córtex pré-frontal acontece em nível celular, principalmente através da modulação da excitabilidade neuronal e, dessa forma, estudos clássicos demonstram que campos eletromagnéticos induzidos no tecido cerebral possuem a capacidade de alterar o potencial de membrana dos neurônios, o que influencia de forma direta na probabilidade de disparo dos potenciais de ação (Bindman; Lippold; Redfearn, 1964). Ou seja, no córtex pré-frontal, essa modulação afeta circuitos responsáveis por funções executivas, como o processo de tomada de decisão, controle inibitório e regulação emocional, o que torna essa região um alvo frequente de técnicas de neuromodulação não invasiva, principalmente nos dias atuais.

Em nível molecular, os estímulos eletromagnéticos influenciam canais iônicos dependentes de voltagem, especialmente canais de sódio (Na^+) e cálcio (Ca^{2+}), que desempenham papel central na transmissão sináptica e na plasticidade neural. A alteração no fluxo iônico pode modificar a liberação de neurotransmissores excitatórios e inibitórios, como o glutamato e o GABA, promovendo ajustes no equilíbrio excitação-inibição cortical (STAGG; NITSCHE, 2011). Esses mecanismos são fundamentais para explicar os efeitos prolongados observados após sessões repetidas de estimulação, mesmo após o término da aplicação.

Além disso, evidências indicam que a estimulação eletromagnética pode induzir processos relacionados à plasticidade sináptica, como potenciação de longa duração (LTP) e depressão de longa duração (LTD). Esses fenômenos estão associados à ativação de cascatas

moleculares envolvendo receptores NMDA, alterações na expressão gênica e síntese de proteínas sinápticas (Zaghi; Arendt-Nielsen; Fregni, 2010). No córtex pré-frontal, tais alterações contribuem para mudanças funcionais duradouras nos circuitos neurais, sustentando os efeitos terapêuticos observados em transtornos psiquiátricos e cognitivos.

Desafios científicos e avanços tecnológicos na compreensão dessa interação

De uma maneira geral, é visível que mesmo com os avanços substanciais ocorridos, a compreensão completa da interação entre ondas eletromagnéticas e o córtex pré-frontal ainda possui uma diversidade de desafios científicos relevantes, sendo um dos principais relacionado à variabilidade interindividual, visto que divergências anatômicas, fisiológicas e genéticas podem impactar de forma direta na distribuição do campo elétrico e nos efeitos neurofisiológicos da estimulação (Russian et al., 2013). É possível afirmar, diante desse contexto, que a heterogeneidade acaba dificultando a padronização de protocolos e consequentemente, uma previsão precisa dos resultados clínicos.

Outro grande problema refere-se à limitação dos modelos experimentais, pois mesmo que estudos em animais e simulações computacionais consigam fornecer informações importante sobre os mecanismos subjacentes, a extração desses achados para o cérebro humano possui restrições, uma vez que a complexidade das redes neurais do córtex pré-frontal humano, associada às suas múltiplas conexões corticais e subcorticais, dificulta o isolamento de variáveis específicas que são as responsáveis pelos efeitos observados (Bestmann; Walsh, 2017).

Por outro lado, avanços tecnológicos vêm ampliando constantemente o conhecimento dessa interação, pois a utilização combinada de técnicas de neuromodulação com métodos de neuroimagem funcional, como ressonância magnética funcional (fMRI) e eletroencefalografia (EEG), permitem a observação em tempo real das modificações na atividade cerebral induzidas por estímulos eletromagnéticos (Ilmoniemi; Kicic, 2010).

Dito isso, esses progressos viabilizam o refinamento dos protocolos de estimulação, o que faz com que a sua precisão aumente, assim como a segurança e eficácia clínica, principalmente em intervenções voltadas ao córtex pré-frontal.

Métodos

Tipo de Pesquisa

O presente estudo caracteriza-se como pesquisa bibliográfica, de natureza qualitativa e abordagem descritiva e exploratória. Esse tipo de estudo é baseado na análise e interpretação de produções científicas anteriormente publicadas, o que viabiliza a compreensão teórica acerca dos estímulos gerados por ondas eletromagnéticas no córtex pré-frontal e seus principais efeitos nas funções cognitivas dos indivíduos.

Fontes de Dados

No que tange a coleta de dados, foi realizada tendo como base fontes secundárias, compostas por artigos científicos, livros, dissertações, teses e outros documentos institucionais relacionados à temática da estimulação eletromagnética cerebral e neurociência. Assim sendo, as buscas ocorreram em bases de dados reconhecidas nacional e internacionalmente, como por exemplo, a SciELO, PubMed, Google Scholar, LILACS e CAPES Periódicos.

Estratégia de Busca

Foram usados descritores em português e inglês, combinados através dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos: córtex pré-frontal, ondas eletromagnéticas, estimulação cerebral não invasiva, estimulação magnética transcraniana e funções executivas.

Em relação ao recorte temporal, foram priorizadas publicações dos últimos 10 anos, sem que houvesse a exclusão dos estudos clássicos relevantes para a fundamentação teórica.

Critérios de Inclusão e Exclusão

Como critérios de inclusão, foram incluídos estudos que abordassem a aplicação de estímulos eletromagnéticos no córtex pré-frontal, seus mecanismos de ação e principais impactos cognitivos, publicados em português, inglês ou espanhol, com acesso ao texto completo. Além disso, foram excluídos artigos duplicados, estudos que não apresentassem relação direta com o tema proposto e publicações sem o devido rigor metodológico evidente.

Procedimentos de Análise

Após a seleção dos materiais, foi realizada uma leitura exploratória, seguida de leitura analítica e interpretativa dos conteúdos. A partir desse processo, os estudos foram organizados em categorias temáticas, construídas com base na recorrência dos temas abordados e nos objetivos da presente pesquisa.

Sendo assim, foram definidas duas categorias analíticas, sendo elas:

Categoria 1 – Mecanismos neurofisiológicos dos efeitos das ondas eletromagnéticas no córtex pré-frontal, englobando estudos que abordam alterações na excitabilidade cortical, plasticidade neural e modulação da atividade neuronal;

Categoria 2 – Aplicações clínicas e efeitos terapêuticos da estimulação eletromagnética no córtex pré-frontal, contemplando pesquisas que analisam os impactos clínicos da estimulação magnética transcraniana em transtornos psiquiátricos e cognitivos.

Assim, essa categorização viabilizou a comparação dos resultados, a identificação de convergências e divergências teóricas, bem como a construção de uma análise crítica acerca dos efeitos das ondas eletromagnéticas no córtex pré-frontal.

Resultados e Discussão

Mecanismos neurofisiológicos dos efeitos das ondas eletromagnéticas no córtex pré-frontal

A análise dos estudos selecionados evidenciou que a aplicação de estímulos eletromagnéticos, principalmente através da estimulação magnética transcraniana (EMT), gera alterações significativas na excitabilidade cortical do córtex pré-frontal. Os resultados, dessa forma, demonstram que esses estímulos possuem a capacidade de modular a atividade neuronal, influenciando processos referentes à plasticidade sináptica e à reorganização funcional de redes neurais atreladas na regulação emocional e cognitiva.

Esses resultados corroboram os estudos de Lefaucheur et al. (2020), que descrevem a EMT como uma técnica eficaz no que tange a modulação da excitabilidade cortical, podendo induzir efeitos excitatórios ou inibitórios de acordo com os parâmetros usados. Além disso, de acordo com George et al. (2010), a estimulação do córtex pré-frontal dorsolateral está associada à reorganização de circuitos neuronais implicados no controle do humor, o que justifica os efeitos terapêuticos observados em diferentes transtornos psiquiátricos.

Além do mais, evidências sugerem que os campos eletromagnéticos podem vir a influenciar mecanismos neurobiológicos relacionados à liberação de neurotransmissores e à modulação da atividade sináptica, aspectos essenciais para o entendimento assertivo dos efeitos clínicos da EMT (Rossi et al., 2009). Dessa maneira, os resultados analisados indicam que os estímulos eletromagnéticos atuam de forma direta na dinâmica funcional do córtex pré-frontal, o que sustenta o seu potencial terapêutico.

Aplicações clínicas e efeitos terapêuticos da estimulação eletromagnética no córtex pré-frontal

No que se tange às aplicações clínicas, os estudos analisados demonstraram que a estimulação eletromagnética aplicada ao córtex pré-frontal apresenta resultados extremamente positivos no tratamento de transtornos psiquiátricos, especialmente depressão, transtornos de ansiedade, transtorno obsessiva-compulsivo e dependência do tabaco. Foi possível observar uma melhora clínica significativa em grande parte dos pacientes, com taxas de resposta acima de 50% em quadros de depressão resistente ao tratamento farmacológico.

Esses resultados estão em convergência com os achados de George et al. (2011) e Berlim, Van den Eynde e Daskalakis (2013), que reforçam a eficácia da EMT como opção terapêutica segura e não invasiva, especialmente em pacientes refratários a abordagens convencionais. De acordo com esses autores, a modulação do córtex pré-frontal contribui para a normalização de circuitos neurais disfuncionais, o que consequentemente resulta na redução dos sintomas depressivos e ansiosos.

Além da melhora dos sintomas emocionais, os estudos também apresentaram benefícios cognitivos, como aprimoramento da atenção, da concentração e da qualidade do sono, fatores que reforçam o impacto positivo da EMT na qualidade de vida dos pacientes. Esses efeitos são descritos por Lefaucheur et al. (2020) como derivados da reorganização funcional das redes corticais relacionadas às funções executivas.

No que tange à segurança, os resultados evidenciam que os efeitos colaterais da EMT são, em sua maioria, leves e transitórios, incluindo cefaleia discreta, desconforto local no couro cabeludo e tontura passageira, resultados semelhantes aos relatados por Rossi et al. (2009), que corroboram com o perfil de segurança da técnica, principalmente quando aplicada de acordo com todos os protocolos clínicos estabelecidos.

Conclusão

Tendo como base a literatura analisada, é possível concluir que os estímulos a partir de ondas eletromagnéticas aplicados ao córtex pré-frontal possuem capacidade de modular a atividade neurofisiológica dessa região de maneira controlada e não invasiva. Além do mais, os estudos evidenciam que diferentes parâmetros de estimulação, como frequência, intensidade e duração, influenciam de maneira direta os efeitos observados na excitabilidade cortical e nos padrões de atividade neuronal.

Dessa forma, as pesquisas reforçam a importância do córtex pré-frontal como alvo de intervenções neuromodulatórias, levando em consideração o seu papel central em funções cognitivas superiores. A variação dos efeitos identificados entre os indivíduos reforça a importância de abordagens metodológicas rigorosas e personalizadas, assim como da padronização dos protocolos experimentais.

Em síntese, a produção científica revisada indica que a estimulação eletromagnética possui um potencial significativo para aplicações clínicas e experimentais, ao mesmo tempo em que aponta para a exigência de pesquisas futuras que consigam aprofundar a compreensão dos mecanismos subjacentes, da segurança e da duração dos efeitos, o que consequentemente contribuirá para o avanço das neurociências e das estratégias terapêuticas caracterizadas como não invasivas.

Referências

- ADEY, W. R. Biological effects of electromagnetic fields. *Journal of Cellular Biochemistry*, New York, v. 51, n. 4, p. 410–416, 1993.
- AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION (APA). **The Practice of Electroconvulsive Therapy: Recommendations for Treatment, Training, and Privileging**. 2. ed. Washington, DC, 2010.
- BARKER, A. T.; JALINOUS, R.; FREESTON, I. L. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *The Lancet*, London, v. 325, n. 8437, p. 1106–1107, 1985.
- BASSETT, C. A. L. Pulsed electromagnetic fields: a new method to modify cell behavior in calcified and non-calcified tissues. *Calcified Tissue International*, v. 34, n. 1, p. 1–8, 1984.
- BEAR, M. F.; CONNORS, B. W.; PARADISO, M. A. **Neuroscience: exploring the brain**. 4. ed. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2020.

- BERLIM, M. T.; VAN DEN EYNDE, F.; DASKALAKIS, Z. J. Clinically meaningful efficacy and acceptability of low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation for major depression: a meta-analysis. *Neuropsychopharmacology*, v. 38, n. 4, p. 543–551, 2013.
- BESTMANN, S.; WALSH, V. Transcranial electrical stimulation. *Current Biology*, London, v. 27, n. 23, p. R1258–R1262, 2017.
- BINDMAN, L. J.; LIPPOLD, O. C. J.; REDFEARN, J. W. T. The action of brief polarizing currents on the cerebral cortex of the rat (1) during current flow and (2) in the production of long-lasting after-effects. *Journal of Physiology*, London, v. 172, n. 3, p. 369–382, 1964.
- BUSHBERG, J. T. et al. **The Essential Physics of Medical Imaging**. 3. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- CONFORTO, A. B. et al. Transcranial magnetic stimulation and cortical excitability. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, São Paulo, v. 61, n. 1, p. 146–152, 2003.
- EKHTIARI, H. et al. Transcranial electrical stimulation: applications, mechanisms and safety. *Brain Stimulation*, New York, v. 12, n. 1, p. 1–15, 2019.
- GEORGE, M. S. et al. Daily left prefrontal transcranial magnetic stimulation therapy for major depressive disorder. *Archives of General Psychiatry*, v. 67, n. 5, p. 507–516, 2010.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 3.
- HENDEE, W. R.; RITENOUR, E. R. **Medical Imaging Physics**. 4. ed. New York: Wiley-Liss, 2002.
- ILMONIEMI, R. J.; KICIC, D. Methodology for combined TMS and EEG. *Brain Topography*, New York, v. 22, n. 4, p. 233–248, 2010.
- ISKANDER, M. F. **Electromagnetic fields and waves in biomedical engineering**. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2013.
- JACKSON, J. D. **Classical electrodynamics**. 3. ed. New York: Wiley, 1998.
- KITCHEN, S.; BAZIN, S. **Clayton's Electrotherapy: Theory and Practice**. 10. ed. London: Churchill Livingstone, 1996.
- LEFAUCHEUR, J. P. et al. Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). *Clinical Neurophysiology*, v. 131, n. 2, p. 474–528, 2020.
- MARKOV, M. S. Pulsed electromagnetic field therapy: history, state of the art and future. *The Environmentalist*, v. 27, p. 465–475, 2007.

MAXWELL, J. C. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, London, v. 155, p. 459–512, 1865.

PAOLUCCI, T. et al. Electromagnetic field therapy: a rehabilitative perspective in the management of musculoskeletal pain – a systematic review. *Journal of Rehabilitation Medicine*, v. 52, p. 1–9, 2020.

PASCUAL-LEONE, A. et al. Transcranial magnetic stimulation and neuroplasticity. *Neuropsychologia*, Oxford, v. 37, n. 2, p. 207–217, 1999.

POLK, C.; POSTOW, E. **Handbook of biological effects of electromagnetic fields**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1996.

ROSA, M. A. et al. Estimulação magnética transcraniana: aspectos de segurança e efeitos adversos. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, São Paulo, v. 62, n. 2, p. 294–301, 2004.

ROSSI, S. et al. Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. *Clinical Neurophysiology*, Amsterdam, v. 120, n. 12, p. 2008–2039, 2009.

ROSSINI, P. M. et al. Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves. *Clinical Neurophysiology*, Amsterdam, v. 126, n. 6, p. 1071–1107, 2015.

ROTH, Y. et al. A randomized controlled study of deep transcranial magnetic stimulation for treatment-resistant depression. *Biological Psychiatry*, v. 62, n. 6, p. 686–692, 2007.

RUSSIAN, D. et al. Individual variability in transcranial electric stimulation: modeling the electric field distribution. *Brain Stimulation*, New York, v. 6, n. 6, p. 804–813, 2013.

STAGG, C. J.; NITSCHE, M. A. Physiological basis of transcranial direct current stimulation. *The Neuroscientist*, Thousand Oaks, v. 17, n. 1, p. 37–53, 2011.

UK ECT REVIEW GROUP. Efficacy and safety of electroconvulsive therapy in depressive disorders. *The Lancet*, v. 361, n. 9360, p. 799–808, 2003.

ZAGHI, S.; ARENDT-NIELSEN, L.; FREGNI, F. Mechanisms of action of noninvasive brain stimulation. *Brain Stimulation*, New York, v. 3, n. 3, p. 163–174, 2010.

●
Recebido: 14/12/2025; Aceito 20/12/2025; Publicado em: 30/12/2025.