



CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE FREQUÊNCIA EXTREMAMENTE BAIXA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL: MODELAGEM FÍSICA, RISCO EPIDEMIOLÓGICO E LACUNAS REGULATÓRIAS PARA POPULAÇÕES TRADICIONAIS NO PIAUÍ

Patrício Noé da Fonseca¹

¹*Bacharelado em Física (UNINTER); Procurador da República (MPF). Teresina, PI
(patriciofonseca@mpf.mp.br)*

Resumo: LTs de 60 Hz associadas a parques renováveis no Piauí operam em regime quasi-estático, sem dissipação. Biot-Savart (torre VX CHESF: d=11m, h=22m) demonstra que LTs 500 kV excedem 0,3 μ T a ~111–122 m; o limite ANEEL/ICNIRP supera esse limiar em ~280 $\times$. Sete documentos verificados revelam três tipologias de omissão ELF: estrutural, qualificada e consumada. Revisão sistemática confirma lacuna de estudos em PCT brasileiras. MONITER fornecerá validação empírica.

Palavras-chave: Campos ELF; linhas de transmissão; populações tradicionais; Biot-Savart; licenciamento ambiental

INTRODUÇÃO

O Piauí tornou-se, nos últimos anos, uma das principais fronteiras da expansão de energia eólica e solar fotovoltaica no Brasil. Quem circula pelo interior do estado já identifica esse fenômeno na paisagem: torres eólicas nos topos das serras, fileiras de painéis solares nas chapadas do cerrado e – menos visíveis, mas igualmente presentes – linhas de transmissão de 138 a 500 kV cortando territórios de comunidades indígenas, quilombolas e ribeirinhas. O presente trabalho parte de uma constatação feita no exercício de atividades institucionais em Teresina: em nenhum dos doze procedimentos extrajudiciais e judiciais relacionados a parques de energia renovável registrados pela Procuradoria da República no Piauí até maio de 2026 (PRPI, 2026) há avaliação específica de exposição a campos eletromagnéticos de frequência extremamente baixa (ELF, 60 Hz) gerados pelas linhas de transmissão correlatas. Essa lacuna é o ponto de partida deste estudo.

A literatura epidemiológica sobre campos ELF e saúde humana tem uma história de quase cinco décadas, e é importante não nivelá-la cronologicamente. O estudo seminal de Wertheimer e Leeper (1979) identificou associação entre proximidade a linhas de transmissão e câncer infantil,

mas usava configuração de fiação como proxy da exposição, o que se considera uma metodologia frágil. Foi preciso esperar o estudo de Feychting e Ahlbom (1993), com medição direta de campos, para que a hipótese ganhasse substância. Duas *pooled analyses* independentes consolidaram o limiar de referência: Ahlbom et al. (2000) encontraram risco relativo de 2,0 para leucemia infantil acima de 0,4 μ T; Greenland et al. (2000), risco relativo de 1,7 acima de 0,3 μ T. A revisão sistemática e metanálise mais recente – Brabant et al. (2022) – confirma a associação positiva com riscos relativos entre 1,3 e 2,0, mais fortes em estudos anteriores a 2000, com atenuação em estudos recentes conduzidos em países de alta renda onde a prevalência de exposições elevadas é baixa; esse padrão temporal não é necessariamente extrapolável para populações rurais tradicionais brasileiras residindo dentro de faixas de servidão de LTs em operação. Com base na evidência acumulada, a Agência Internacional de Pesquisa sobre Câncer classificou campos ELF como possível carcinógeno humano, Grupo 2B (IARC, 2002). O que a regulação brasileira – Lei nº 11.934/2009 e RN ANEEL nº 398/2010 – adotou como limite de 83,3 μ T para exposição pública foi calibrado não sobre essa literatura, mas sobre efeitos agudos de



estimulação do sistema nervoso periférico em curtas exposições: outro problema, outro regime, outro tempo de exposição.

Este trabalho persegue três objetivos articulados. Primeiro, demonstrar por que o argumento de que “o campo eletromagnético se dissipa no ar” – ainda circulante em discussões técnicas sobre licenciamento de linhas de transmissão – é fisicamente impreciso: confunde dois regimes distintos que a eletrodinâmica clássica trata de forma separada (Jackson, 1999). Segundo, quantificar as curvas de densidade de fluxo magnético $B(r)$ para a geometria documentada das torres de 500 kV no sistema piauiense, avaliando o efeito do sag dos cabos sobre a exposição efetiva ao nível do solo. Terceiro, articular essa modelagem com a análise empírica de estudos ambientais e documentos de procedimentos institucionais do MPF/PI, e com o Projeto MONITER (UESPI/UFPI/Fiocruz, 2026) como iniciativa de monitoramento longitudinal em curso.

MATERIAL E MÉTODOS

A modelagem física baseia-se na Lei de Biot-Savart aplicada a configurações trifásicas balanceadas, que é a configuração padrão das torres treliçadas do SIN. O ponto de partida conceitual é a distinção entre campo irradiado e campo quasi-estático. A 60 Hz, o comprimento de onda no vácuo é $\lambda = c/f \approx 5 \times 10^6$ m. A qualquer distância $r \ll \lambda/2\pi \approx 800$ km, o campo encontra-se inteiramente no regime quasi-estático de campo próximo (Jackson, 1999, caps. 5 e 8; Griffiths, 2022, seções 5.1–5.3): não há radiação propagante, não há vetor de Poynting com componente ativa relevante, e o decaimento com a distância é determinado exclusivamente pela geometria, não por dissipação.

Para linha trifásica balanceada com separação entre fases d , a superposição vetorial das três correntes defasadas em 120° cancela a contribuição dipolar de ordem $1/r$, resultando em decaimento de $1/r^2$, conforme a equação:

$$B(r) \approx (\sqrt{3} \mu_0 I d)/(4\pi r^2) \quad (1)$$

Os parâmetros adotados correspondem à geometria da torre VX CHESF, documentada para a LT 500 kV Presidente Dutra–Teresina como configuração de referência piauiense (Neumann et al., 2007): separação entre fases $d = 11$ m, configuração horizontal, altura dos condutores $h = 22$ m. A corrente nominal é $I_{nom} = 1.000$ A, com envelope de

carregamento de 0,2 a 1,2 Inom – faixa representativa do perfil diário do SIN.

O sag natural dos cabos (catenária) reduz a altura efetiva dos condutores ao solo no ponto médio entre torres. Para $h = 22$ m, o efeito do sag sobre a posição da isolinha de $0,3 \mu T$ é inferior a 2 m de deslocamento entre altura nominal e flecha máxima, resultado que relativiza o argumento do sag para essa geometria específica e estabelece as estimativas apresentadas como conservadoras. O argumento permanece relevante para torres de menor altura (138 kV, $h \approx 10$ m).

O mecanismo de interação com tecido biológico opera por indução de Faraday, expressa pela equação:

$$\nabla \times E = -\partial B/\partial t \quad (2)$$

Um campo magnético variável a 60 Hz induz correntes em fluidos biológicos independentemente de qualquer propagação ondulatória, mecanismo distinto da estimulação de tecido excitável que fundamenta os limites ICNIRP, e pertinente ao mecanismo do par radical (Rodgers e Hore, 2009; Hore e Mouritsen, 2016), que opera por coerência quântica de spin fora do equilíbrio termodinâmico, respondendo à objeção clássica de que a energia de interação ELF é inferior à energia térmica kT (Malmivuo e Plonsey, 1995).

O componente empírico consiste na análise documental de estudos ambientais acessíveis publicamente na base SIGA/SEMAR-PI e de documentos de procedimentos institucionais registrados no MPF/PI (Certidão nº 733/2026-SEEXTJ/PRPI), com busca sistemática por avaliações de campos eletromagnéticos, ELF, radiação não ionizante e impactos em saúde das populações residentes. Sete documentos foram lidos integralmente e verificados de forma direta. O componente geoespacial sobrepõe o SIGEL/ANEEL (linhas de transmissão ativas e projetadas) às bases cartográficas de territórios indígenas (FUNAI) e quilombolas (INCRA) mediante buffers de 70, 200 e 500 m em ambiente QGIS. O buffer de 200 m engloba a faixa em que o limiar epidemiológico de $0,3 \mu T$ é excedido por LTs de 500 kV em carregamento nominal (~ 111 m) e de pico (~ 122 m), com margem precaucional. A análise regulatória contrasta os limites da Lei nº 11.934/2009 e da RN ANEEL nº 398/2010 com os parâmetros ICNIRP (2010) e com o dever de avaliação de impacto em



saúde do artigo 7º, §3º, da Convenção nº 169 da OIT (OIT, 1989), incorporada ao direito brasileiro pelo Decreto nº 5.051/2004.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado mais importante da modelagem não é numérico, mas conceitual. Ao calcular $B(r)$ para LTs de 60 Hz, confirma-se que o regime quasi-estático é a única descrição fisicamente correta para todas as distâncias de interesse. O argumento de que “o campo se dissipa no ar antes de chegar às casas”, recorrente em discussões de licenciamento, comete um erro de categoria: aplica ao regime de campo próximo ($1/r^2$, sem radiação) o raciocínio válido para o regime de campo distante ($1/r$, com atenuação atmosférica). A 60 Hz, a fronteira entre os dois regimes fica em ~ 800 km, isto é, a linha de transmissão está sempre, em qualquer cenário prático, no interior da zona quasi-estática. O campo não viaja até as residências: ele está lá, produzido localmente pela corrente que flui no condutor.

Para a torre VX CHESF ($d = 11$ m, $h = 22$ m), a simulação por Biot-Savart fornece os seguintes resultados: o limiar epidemiológico de $0,3 \mu\text{T}$ é atingido a ~ 111 m sob carregamento nominal ($I_{\text{nom}} = 1.000$ A) e ~ 122 m sob carregamento de pico ($I_{\text{max}} = 1.200$ A). Sob carregamento mínimo noturno ($I_{\text{min}} = 200$ A), o limiar de $0,3 \mu\text{T}$ é atingido a ~ 46 m. O efeito do sag para $h = 22$ m não supera 2 m de deslocamento da isolinha: as estimativas apresentadas são, portanto, adequadas para a geometria real do sistema piauiense. Comparando com o limite regulatório brasileiro de $83,3 \mu\text{T}$ (ANEEL, 2010; ICNIRP, 2010): a diferença é de aproximadamente 280 vezes. Não se trata de uma margem de segurança; trata-se de dois critérios de proteção completamente distintos aplicados ao mesmo agente físico: um calibrado para estimulação aguda do sistema nervoso periférico em curtas exposições, o outro derivado de estudos de coorte com exposição crônica residencial durante anos ou décadas (WHO, 2007).

A análise empírica abrangeu sete documentos verificados integralmente e permite identificar três tipologias analíticas de omissão. A primeira é a omissão estrutural: o EIA do Complexo Solar Fotovoltaico Bonito (SEMAR-PI, jan. 2020, 225 p.) não avalia qualquer agente físico além de solo e recursos hídricos; o EIA do Complexo Fotovoltaico Sol de Itaueira (SEMAR-PI, 2022, 326 p.) trata a LT de 500 kV de conexão ao SIN como componente do

empreendimento (§3.3.2.9), avalia ruídos com medições e simulação, mas não avalia campos eletromagnéticos em nenhuma seção. Nesses dois casos, a omissão é formalmente lícita: nenhum instrumento normativo exige avaliação ELF no Termo de Referência do EIA — e é precisamente esse dado que demonstra que o desajuste é estrutural, não episódico.

A segunda tipologia é a omissão qualificada, em que populações residentes são nominalmente identificadas no documento e o agente físico mais persistente gerado pelo empreendimento não é avaliado. O EAS da LT 500 kV SE Rocha Eterna-SE São João do Piauí (SEMAR-PI, abr. 2024, 115 p.) – o caso mais grave documentado – lista nominalmente 26 imóveis interceptados pela faixa de servidão, incluindo o Assentamento Primavera (542 ha), Vila Betânia e Vila Foca; avalia ruído, fauna, flora e uso do solo; e não contém qualquer menção a campos eletromagnéticos, ELF, Lei nº 11.934/2009 ou saúde humana por exposição ao campo magnético. O RIMA do Complexo FV São João do Piauí (CONSPLAN/PactoEnergia, out. 2021, 80 p.) realiza medição de ruído *in loco* no centro do Assentamento São Domingos (visitado em 29/03/2021, ~ 20 residências, coordenadas UTM documentadas) e omite por completo a exposição ELF, revelando que a capacidade técnica de avaliação *in loco* existia.

A terceira tipologia é a omissão consumada, que emerge quando o empreendimento já está em operação e a exposição ELF é um fato presente, não um risco prospectivo. O RIMA do Complexo Eólico Araripe IV (Maron Ambiental, abr. 2021, 92 p.) identifica 27 núcleos populacionais na Área de Influência Direta do empreendimento e da LT 500 kV correlata (~ 49 km), incluindo a comunidade quilombola Serra dos Rafaéis (1,32 km da ADA), e não avalia campos ELF em nenhuma seção dos três meios analisados. O empreendimento foi inaugurado em 11/06/2025 e está em plena operação. Relatório de visita de campo no proc. 1.27.000.000770/2024-39 documenta que a LT de conexão atravessa área de roçado da comunidade Serra dos Rafaéis e registra sintomas de saúde atribuídos à proximidade da infraestrutura – insônia, estresse, crises respiratórias – sem que os campos eletromagnéticos tenham sido sequer levantados como fator de risco. Quando o campo ELF é omitido em fase de licenciamento de um empreendimento já inaugurado, a lacuna



regulatória torna-se um problema de exposição atual não monitorada.

Um quarto elemento acrescenta dimensão analítica relevante: o Estudo de Avaliação de Impacto e o Estudo do Componente Quilombola do Complexo FV Graviola I–IV (GEOPI/RM Arqueologia, 2020/2021), juntados ao proc. 1.27.004.000101/2021-84, constituem o único caso – dentre os sete documentos verificados – em que a Lei nº 11.934/2009 e a RN ANEEL nº 398/2010 são nominalmente mencionadas. Entretanto, a menção restringe-se ao dimensionamento geométrico da faixa de servidão da LT de 230 kV (~17 km) como “Área C”, sem qualquer avaliação de saúde pública. A menção nominal à norma sem avaliação de saúde é, paradoxalmente, a forma mais refinada de omissão: o licenciamento reconhece a existência do agente físico como categoria regulatória e o descarta como problema de saúde pública.

Os procedimentos institucionais registrados no MPF/PI (Certidão nº 733/2026-SEEXTJ/PRPI) confirmam que o padrão identificado nos documentos verificados é consistente com o universo de empreendimentos já objeto de acompanhamento institucional.

O Projeto MONITER emergiu, para este trabalho, de uma reunião realizada em 19 de maio de 2026 na Procuradoria da República em Teresina, quando o coordenador do projeto, Prof. Dr. Vinícius Alexandre da Silva Oliveira (UESPI), apresentou a proposta e solicitou apoio institucional para acesso ao Fundo Estadual de Meio Ambiente do Piauí. O MONITER prevê mensuração direta de campos eletromagnéticos nas comunidades monitoradas, mas reconhece expressamente a ausência de parâmetros técnicos e sanitários consolidados sobre distâncias seguras e níveis aceitáveis de exposição (MONITER, 2026). As curvas $B(r)$ calibradas para a geometria real das torres VX CHESF e os limiares aqui calculados são propostos como esse protocolo faltante – o que permitiria ao MONITER conduzir análise dose-resposta estratificada por gradiente de exposição.

CONCLUSÃO

A modelagem desenvolvida neste trabalho leva a três conclusões que se reforçam mutuamente. Do ponto de vista físico: campos ELF de 60 Hz não se dissipam no ar – o decaimento é geométrico ($1/r^2$), não dissipativo; para a geometria real das torres VX CHESF no sistema piauiense ($d = 11$ m, $h = 22$ m), o

limiar epidemiológico de $0,3 \mu\text{T}$ é atingido a ~111 m sob carregamento nominal – faixa que o licenciamento ambiental sistematicamente não avaliou. Do ponto de vista regulatório: o limite brasileiro de $83,3 \mu\text{T}$ supera o limiar epidemiológico por fator de ~280×, tendo sido calibrado para estimulação aguda do sistema nervoso periférico, não para exposição crônica residencial. Do ponto de vista empírico, os documentos verificados revelam três tipologias de omissão: estrutural (EIAs sem exigência normativa de avaliação ELF); qualificada (LT com populações nominalmente identificadas sem avaliação ELF; caso mais grave: LT Rocha Eterna); e consumada (empreendimento em operação com exposição atual não monitorada; caso Araripe IV/Serra dos Rafaéis). Adicionalmente, o único caso com menção nominal à Lei nº 11.934/2009 nos doze procedimentos registrados no MPF/PI (Graviola I–IV) demonstra que o reconhecimento normativo do agente físico não equivale à avaliação de seus efeitos em saúde, o que representa a forma mais refinada da omissão identificada. O Projeto MONITER é a resposta prospectiva a essa omissão estrutural; este trabalho propõe um modelo físico e uma tipologia empírica que poderão contribuir para a construção do protocolo de campo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Vinícius Alexandre da Silva Oliveira (UESPI) e à equipe do Projeto MONITER, pela interlocução institucional e pelo compartilhamento do projeto de monitoramento. À Procuradoria da República no Piauí (MPF), pelo acesso à documentação institucional que fundamenta o componente empírico deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AHLBOM, A. et al. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*, 83(5), 692–698, 2000.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 398, de 13 de julho de 2010. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010.
- BRABANT, C. et al. Exposure to magnetic fields and childhood leukemia: a systematic review and meta-analysis of case-control and cohort studies. *Reviews on Environmental Health*, 38(2), 229–253, 2022.
- BRASIL. Decreto nº 5.051, de 19 de abril de 2004. Promulga a Convenção nº 169 da OIT. Brasília, 2004.



BRASIL. Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009. Diário Oficial da União, Brasília, 2009.

FEYCHTING, M.; AHLBOM, A. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *American Journal of Epidemiology*, 138(7), 467–481, 1993.

GREENLAND, S. et al. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiology*, 11(6), 624–634, 2000.

GRIFFITHS, D. J. *Introduction to Electrodynamics*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

HORE, P. J.; MOURITSEN, H. The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annual Review of Biophysics*, 45, 299–344, 2016.

IARC. *Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*. IARC Monographs, 80. Lyon: IARC Press, 2002.

ICNIRP. *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)*. *Health Physics*, 99(6), 818–836, 2010.

JACKSON, J. D. *Classical Electrodynamics*. 3rd ed. New York: Wiley, 1999.

KHEIFETS, L. et al. The precautionary principle and EMF: implementation and evaluation. *Journal of Risk Research*, 13(5), 543–556, 2010.

MALMIVUO, J.; PLONSEY, R. *Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*. New York: Oxford University Press, 1995.

MONITER. *Projeto de Monitoramento dos Impactos Socioambientais e na Saúde em Comunidades Adjacentes a Áreas Geradoras de Energia Renovável. Requerimento de apoio institucional*. Coordenador: Vinícius Alexandre da Silva Oliveira. UESPI/UFPI/Fiocruz, Teresina, 2026.

NEUMANN, C. et al. *Torres de transmissão compactas: soluções para o Sistema Interligado Nacional*. Anais do XIX SNPTEE (CGTI — Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão), 2007.

OIT. *Convenção nº 169 sobre Povos Indígenas e Tribais*. Geneva: Organização Internacional do Trabalho, 1989.

PRPI. Certidão nº 733/2026-SEEXTJ/PRPI. Levantamento de feitos envolvendo eólica e solar fotovoltaica no Piauí. Teresina: Procuradoria da República no Estado do Piauí, 2026.

RODGERS, C. T.; HORE, P. J. Chemical magnetoreception in birds: the radical pair mechanism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(2), 353–360, 2009.

WERTHEIMER, N.; LEEPER, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, 109(3), 273–284, 1979.

WHO. *Extremely Low Frequency Fields. Environmental Health Criteria*, 238. Geneva: World Health Organization, 2007.