

Modelagem Computacional na Avaliação da Exposição de Campos Eletromagnéticos Provenientes de Sistemas Elétricos de Potência, na Faixa de 60Hz

Caiky Breno Santiago Chaves
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Centro de Ciências Exatas e Naturais
Mossoró, Brasil
caiky.chaves@alunos.ufersa.edu.br

Humberto Dionisio de Andrade
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Mossoró, Brasil
humbertodionisio@ufersa.edu.br

Elison Wediley dos Reis Silva
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Centro de Ciências Exatas e Naturais
Mossoró, Brasil
elison.silva@alunos.ufersa.edu.br

Pedro Arthur Freitas da Silva
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Centro de Ciências Exatas e Naturais
Mossoró, Brasil
pedro.silva67350@alunos.ufersa.edu.br

Nickson Saymon de Oliveira Lopes
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Mossoró, Brasil
nicksonsaymon@gmail.com

Resumo— O crescimento da demanda por energia elétrica tem levado à expansão do sistema elétrico de potência, resultando em uma maior exposição da população a campos elétricos e magnéticos de baixa frequência. O objetivo deste trabalho é avaliar a intensidade dos campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de transmissão de 69 kV que operam em 60 Hz e, atendem a subestação de Belo Horizonte, em Mossoró. Neste trabalho, foram utilizadas medições *in loco*, seguindo as diretrizes da norma NBR 25415, e métodos de interpolação espacial para geração de mapas estimativos.

Palavras-Chave— *Campos Eletromagnéticos, Segurança Energética, Linhas de Transmissão, Interpolação Espacial.*

Abstract— The increasing demand for electricity has led to the expansion of the power system, resulting in greater public exposure to low-frequency electric and magnetic fields. The objective of this study is to assess the intensity of electromagnetic fields generated by 69 kV transmission lines operating at 60 Hz, which supply the Belo Horizonte substation in Mossoró. In this study, on-site measurements were conducted following the guidelines of the NBR 25415 standard, along with spatial interpolation methods to generate estimation maps.

Keywords— *Electromagnetic Fields, Energy Security, Transmission Lines, Spatial Interpolation.*

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o Brasil teve um aumento intensivo na demanda de energia por conta dos avanços tecnológicos e do aumento da população. Com isso, para garantir o abastecimento energético ao público, se fez necessário a implementação de sistemas adequados de geração e distribuição. Nesse contexto, a construção de subestações, usinas geradoras e linhas de transmissão tornaram-se indispensáveis e, normalmente, são encontradas nas proximidades de bairros residenciais nas cidades [1,2].

No entanto, essas instalações geram campos elétricos e magnéticos que expõe a população a certos níveis de intensidade. Atualmente, existem estudos que mostram uma pequena relação entre a exposição prolongada de campos magnéticos de baixa frequência com um aumento na

probabilidade de contração da leucemia infantil. Porém, não há nenhum indício dessa doença com a exposição ao campo elétrico [3,4].

Por este motivo, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou em 2010 a REN nº 318, cujo seu escopo é reconhecer os valores limites de exposição de campos eletromagnéticos com base nas pesquisas e valores delimitados anteriormente pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP). Para instalações de 60 Hz, os níveis limites de campo elétrico e campo magnético utilizados no Brasil para a população ocupacional foram de, respectivamente, 8,33 kV/m e 1000 μ T, e para a população geral esses valores foram de 4,17 kV/m e 200 μ T [5,6,7].

Estudos apontam que o uso de *softwares* capazes de realizar modelagens computacionais através de métodos de interpolação espacial, auxiliam no mapeamento local dos níveis de intensidade de campos elétricos e magnéticos ao qual os seres humanos são expostos. Com isso, é possível verificar o comportamento dos campos levando em consideração fatores ambientais [8].

Este trabalho apresenta uma pesquisa realizada no estado do Rio Grande do Norte (RN), na cidade de Mossoró, acerca da exposição de campos eletromagnéticos na faixa de 60 Hz, provenientes das linhas de transmissão que compõe o sistema elétrico de potência. As medições de campo foram realizadas nas proximidades da subestação de Belo Horizonte, seguindo os parâmetros de medição dispostos na NBR 25415. Após a coleta de dados, foi realizada uma análise estatística através de métodos estimativos por intermédio de um *software* capaz de gerar gráficos através de técnicas de interpolação espacial e geoestatísticos. Com isso, este trabalho tem como escopo determinar se os níveis de campos eletromagnéticos da linha de transmissão de baixa tensão estão de acordo com as normas regulamentadoras, por meio da modelagem computacional.

II. METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa, com abordagem experimental. A metodologia empregada envolve medições *in loco* dos campos elétricos e magnéticos provenientes das linhas de transmissão da subestação de Belo Horizonte, em Mossoró/RN, seguindo as diretrizes da norma NBR 25415. Os dados coletados foram analisados por meio de métodos estatísticos e interpolação espacial, visando mapear a distribuição das intensidades dos campos eletromagnéticos no meio de estudo.

A. Definição do meio de estudo

O sistema elétrico de potência (SEP) é composto por quatro etapas fundamentais, geração, transmissão, distribuição e consumo. Em meio a esses processos, a subestação desempenha um papel fundamental no SEP, pois são responsáveis pela transformação dos níveis de tensão para atingir a eficiência energética para o fornecimento adequado ao consumidor por meio das linhas de distribuição. Considerando a relevância dessas instalações na estrutura do SEP, sugeriu-se as linhas de transmissão de 69 kV que atendem a subestação de Belo Horizonte, na cidade de Mossoró, como local de estudo, visualizado na Figura 1, onde serão avaliadas as intensidades dos campos eletromagnéticos na faixa dos 60 Hz.



Fig. 1. 77ª Subestação de Mossoró localizada no bairro Belo Horizonte. Fonte: Site Neoenergia.

A 77ª subestação de Mossoró é responsável pelo atendimento de 300 mil moradores, operando com uma linha de transmissão de alta tensão (69 kV) com três quilômetros de extensão, parte dos quais atravessam o perímetro urbano da cidade. Diante deste contexto, este estudo foi planejado com o objetivo de avaliar as intensidades dos campos eletromagnéticos na faixa dos 60 Hz ao redor dessas linhas de transmissão. Ao final, os dados obtidos serão comparados com os valores limite reconhecidos pela ANEEL, afim de avaliar possíveis impactos e a conformidade com as normas vigentes.

B. Campanhas de medição

Para uma análise da área em estudo, foi necessário adotar as técnicas dispostas na NBR 25415 que padroniza vários métodos de medição, como também delimita níveis de referência para exposição de campos elétricos e magnéticos. O processo foi dividido em três etapas. Na primeira, realizou-se um estudo no local para quantificar os pontos necessários para efetuar as medições, afim de garantir a cobertura a toda área de interesse.

Na segunda etapa, foi-se utilizado de técnicas de georreferenciamento para obter as coordenadas de latitude e longitude desses pontos. Na terceira e última etapa, as medições de campo elétrico e magnético foram realizadas conforme os métodos dispostos na norma vigente, utilizando um dispositivo gaussiano, que permite captar a intensidade dos campos e exibir esses valores no seu *display*.

Ao final das etapas de medição, criou-se uma planilha contendo os dados das coordenadas dos pontos, e os valores de intensidade dos campos elétricos e magnéticos. Por meio disso, houve a exportação desses dados para o software *Google Earth PRO* para geração de uma imagem via satélite, como ilustrado na Figura 2. Os pontos em azul, verde e rosa espalhados sobre a figura, correspondem aos pontos estudados ao decorrer da linha de alta tensão. Foram estabelecidos 43 pontos na área em estudo, distribuídos em perfis transversais à linha de transmissão, com um espaçamento de 3 metros entre cada ponto de medição, em conformidade com a NBR 25415. É de suma importância destacar que esses pontos abrangem áreas com diferentes características, como vegetação, desníveis de solo, residências e vias de alto fluxo, o que em alguns locais, restringiu o comprimento total das medições.

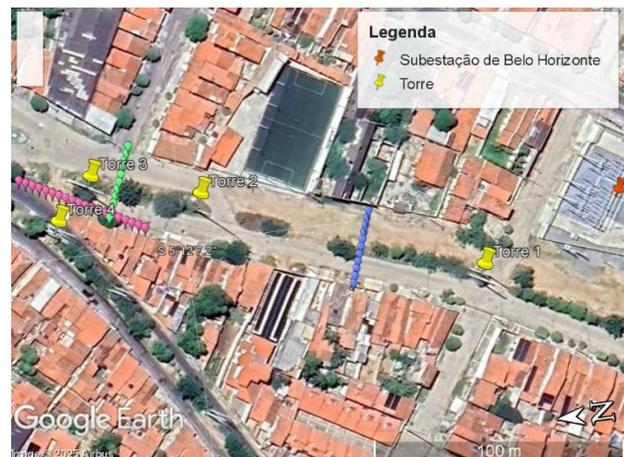


Fig. 2. Mapa de localização da região em análise. Fonte: *Google Earth Pro*.

Para a realização da coleta dos dados geográficos, cada ponto especificado na planilha foi localizado com a utilização de um *smartphone* com GPS, com auxílio de uma ferramenta de inteligência artificial para maior precisão na captura das coordenadas. Em cada um desses pontos, foi posicionado o medidor de campo eletromagnético TM-190 TENMARS, visualizado na Figura 3, o dispositivo conta com um sensor de campo elétrico e magnético capaz de operar na faixa de frequência de 50 Hz à 60 Hz. O aparelho foi fixado a uma altura de 1,5 metros com auxílio de um tripé, demonstrado na Figura 4, garantindo seu isolamento em relação ao chão. Para assegurar medições de campo precisas e seguras, o sensor eletromagnético do TM-190 foi alinhado em relação ao objeto de estudo, de modo a possuir a menor distância entre o condutor e o solo. Além disso, o dispositivo requer um curto intervalo de tempo para estabilização dos valores medidos. Após a estabilização, os valores dos campos foram registrados e associados as suas coordenadas geográficas, sendo

posteriormente armazenados em uma planilha para posterior acesso computacional.



Fig. 3. Medidor de campo eletromagnético TM-190 TENMARS. Fonte: Site TenMars



Fig. 4. Tripé utilizado para isolar o dispositivo da terra. Fonte: Amazon

C. Interpolação Espacial

Para análise estatística e modelagem dos mapas de contorno por meio de métodos de interpolação espacial foi-se utilizado o *software Surfer®*, versão 13, através dos dados da intensidade dos campos e suas coordenadas geográficas. Os valores foram organizados em planilha e importados no programa em forma de *Grid Data*. Após isso, o *software* gerou matrizes de interpolação para os métodos selecionados, no caso do estudo, foi escolhido o método que apresentou menor percentual de erro estimativo através da técnica de validação cruzada.

Além disso, a imagem via satélite da área de estudo foi formatada afim de garantir que os pontos estejam precisamente alinhados com as coordenadas das medições, permitindo sua integração ao software. Em seguida, ocorreu-se a sobreposição da imagem ao gráfico gerado pelo *Surfer® 13*, assegurando a precisão da análise.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 5 e 6 é apresentado o histograma dos valores obtidos a partir das medições de campo. As intensidades de campo elétrico apresentaram uma variação de 0,158 kV/m a 0,002 kV/m. Já o campo magnético, apresentou-se variações entre 0,02 μ T a 0,04 μ T. Comparando-se esses resultados com os limites estabelecidos pela ANEEL, verifica-se que as intensidades medidas estão consideravelmente abaixo dos limites de exposição recomendados. Para a população em geral, o limite de exposição para o campo elétrico é de

4,17kV/m e para o campo magnético é de 200 μ T; já para a população ocupacional, esses valores são de 8,33kV/m e 1000 μ T, respectivamente. Vale salientar que, os picos de intensidade de campo elétrico e magnético foram obtidos no momento de menor distância entre o condutor e o solo, já os demais valores foram diminuindo à medida que o sensor de campo eletromagnético se afastava do objeto de estudo.

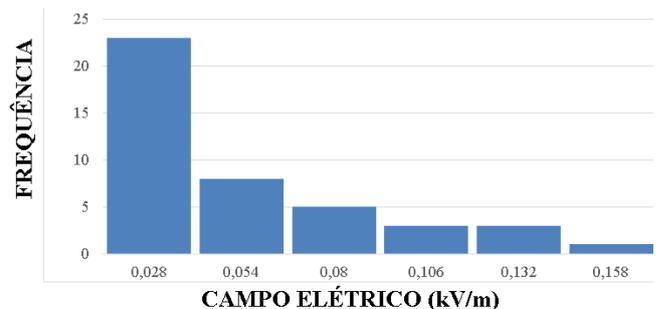


Fig. 5. Histograma das medições em campo elétrico.

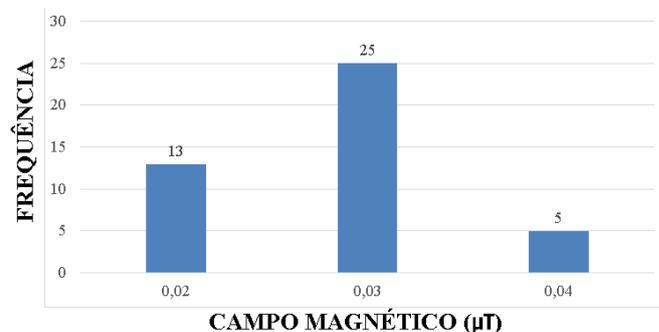


Fig. 6. Histograma das medições de campo magnético

Nas tabelas I e II são apresentados os índices de Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Erro Médio Absoluto (MAE) que foram gerados através do método de validação cruzada no *Surfer®* para os campos elétricos e magnéticos. O valor RMSE é calculado através da raiz quadrada da média dos quadrados dos erros, já o valor MAE é calculado por meio do erro absoluto médio. Esses índices são usados como métricas para avaliar a precisão de modelos, sendo que, quanto menor seus valores, mais preciso será o modelo gerado.

Os métodos locais de interpolação espacial aplicados ao método de validação cruzada foram Triangulação com Interpolação Linear (TLI), Curvatura Mínima (CM). Já os métodos geoestatísticos aplicados foram a Krigagem Ordinária Linear (KO-L), Krigagem Ordinária Gaussiana (KO-G), Krigagem Ordinária Esférica (KO-Es) e Krigagem Ordinária Exponencial (KO-Ex).

Através dos dados disponibilizados nas tabelas I e II, é possível observar que para o campo elétrico, o método que apresentam os menores índices é a Krigagem Ordinária Esférica, com valores de -0,00105064 kV/m para o Erro Médio Absoluto e 0,023473 kV/m para a Raiz do Erro Quadrático Médio. Já para o campo magnético, o método com maior precisão foi a Curvatura Mínima, apresentando dados de

-0,000062493 μT de Erro Médio Absoluto e para a Raiz do Erro Quadrático Médio obteve-se 0,00623051 μT .

TABELA I. Índices MAE e RMSE do campo elétrico para diferentes métodos.

Método	Campo Elétrico (kV/m)	
	Erro Médio Absoluto (MAE)	Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)
TLI	0,00186240247105	0,0193146242734
CM	-0,00386366428247	0,0252563689865
KO-L	-0,00105064641348	0,023473533205
KO-G	0,00169267307111	0,0450552804656
KO-Es	-0,00105064666046	0,0234735329394
KO-Ex	-0,00105062824147	0,0234734932997

TABELA II. Índices MAE e RMSE do campo magnético para diferentes métodos.

Método	Campo Magnético (μT)	
	Erro Médio Absoluto (MAE)	Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)
TLI	-0,000290645528419	0,00547627786546
CM	-6,2493091578e-005	0,00623051946856
KO-L	0,000288236095526	0,00576841800858
KO-G	0,000272238117249	0,00661872209107
KO-Es	0,000288235866887	0,0057684179651
KO-Ex	0,000288233299431	0,00576841351692

As Figuras 7 e 8 apresentam o mapeamento estimativo dos campos elétrico e magnético na área de estudo, utilizando os métodos de maior precisão discutidos anteriormente. Nessas representações, é possível visualizar os diferentes níveis de intensidade em pontos específicos, georreferenciados por latitude e longitude no sistema de coordenadas decimais.

O método da Krigagem Ordinária Esférica aplicado ao campo elétrico indicou os maiores valores de intensidade de campo no ponto de menor distância entre o condutor e o solo, com valores próximos à 0,16 kV/m, o que é coerente com a realidade esperada. Na região central, onde foi realizada a segunda medição, observou-se uma redução nos níveis de campo elétrico, atribuída pela presença significativa de árvores, que interferiram na captura precisa desses valores.

Diante a isso, os valores dos campos elétricos obtidos por meio da modelagem computacional estão 98,08% abaixo do limite estabelecido pela ANEEL para a população ocupacional (8,33 kV/m) e, 96,16% abaixo para a população geral (4,17 kV/m).

O método da Curvatura Mínima usada no campo magnético apresenta também uma concentração maior nas áreas de menor distância entre o condutor e o solo, apresentando picos de até 0,04 μT , encontrando-se de acordo com a teoria. Esses níveis estão dentro do limite estabelecido pela ANEEL, encontrando-se 99,98% abaixo para a população geral (200 μT) e, 99,996% abaixo para a população ocupacional (1000 μT).

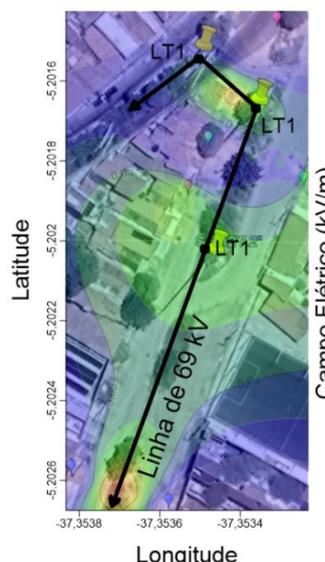


Fig. 7. Mapeamento local do Campo Elétrico utilizando o método de Krigagem Ordinária Esférica.

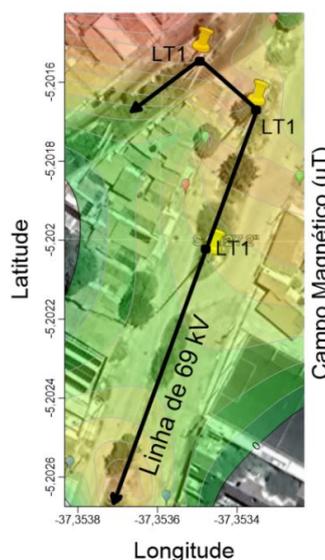


Fig. 8. Mapeamento local do campo magnético utilizando o método de Curvatura Mínima

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou os níveis de exposição a campos elétricos e magnéticos advindas das linhas de transmissão de 69 kV que atendem a subestação de Belo Horizonte, em Mossoró/RN. Foi-se utilizado medições em campo e métodos de interpolação espacial para geração de mapas estimativos. Os resultados demonstraram que os valores obtidos estão dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL para a população geral e ocupacional, mitigando qualquer exposição prejudicial ao ser humano.

A aplicação de métodos como, a Krigagem Ordinária Esférica e a Curvatura Mínima, possibilitou uma modelagem espacial com uma distribuição de intensidades precisa, demonstrando a influência de fatores ambientais, no contexto urbano, na propagação desses campos.

Diante disso, este trabalho contribuiu para a compreensão do uso da modelagem computacional como forma de auxiliar o mapeamento estimativo espacial dos campos eletromagnéticos advindas da infraestrutura elétrica, podendo contribuir nas medidas regulatórias e aprimoramentos técnicos nos setores de energia. Propõe-se como estudos futuros, a realização de novas medições tendo como foco a área da subestação e a influência dos campos gerados pelo seu funcionamento para a população geral e ocupacional. O que pode aprofundar ainda mais a avaliação da segurança eletromagnética nas áreas próximas a subestação de Belo Horizonte.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. Os autores agradecem também, UFERSA, GEPEAT, ao capítulo Estudantil MTTTS – UFERSA, ao ramo Estudantil IEEE UFERSA e a equipe do Laboratório de Telecomunicações e Micro-ondas da UFERSA.

REFERÊNCIAS

- [1] CARVALHO, C. L. S. et al. Avaliação da exposição de campos eletromagnéticos gerados por rede elétrica de média em 13.8 kV da UFERSA, Campus Mossoró: estudo sobre uma exposição populacional na UFERSA. In: ENCONTRO DE COMPUTAÇÃO DO OESTE POTIGUAR (ECOP 2020), 2020, Mossoró. Anais [...]. Mossoró: ECOP, 2020.
- [2] SOUZA, D. M.; MATTOS, R. S.; ALMEIDA, E. S. Elasticidades da demanda residencial de eletricidade no Brasil: uma análise a partir de modelos espaciais. *Revista Brasileira de Energia*, v. 27, n. 4, p. 81-94, 2021. DOI: 10.47168/rbe.v27i4.512.
- [3] CABRAL, Roberto J.; ARNTZEN, Matias A.; OLIVEIRA, Mario O.; MAZZOLETTI, Manuel A.; SILVA, Fernando A. Análise de campos eletromagnéticos em linhas de transmissão paralelas utilizando modelo bidimensional no software FEMM. In: IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2022, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 2195-2205, 10-13 jul. 2022.
- [4] TYNES, T., Haldorsen, T. Residential and occupational exposure to 50 Hz magnetic fields and hematological cancers in Norway. *Cancer Causes Control* 14, 715–720 (2003). DOI: 10.1023/a:1026331807952.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 915, de 23 de fevereiro de 2021. Regulamenta a Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e revoga as resoluções normativas nº 398/2010, nº 413/2010 e nº 616/2014. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021915.pdf>.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 25415: Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60Hz. Rio de Janeiro, 2016.
- [7] ICNIRP - International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (Germany). Health Physics Society. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz to 100 khz).
- [8] FIGUEIREDO, A. L. Estudo e mapeamento de campos eletromagnéticos, na faixa de 60 Hz, em uma subestação de alta tensão e em linhas de transmissão de 230 kV. Tese (Mestrado em engenharia elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Arido, Universidade do Rio Grande do Norte, p. 159. 2019.
- [9] Golden Software. Site do *software Surfer* versão 13. Disponível em: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>