

Campos Elétrico e Magnético em Linhas de Transmissão

Nadson Welkson, Thamyris Evangelista e Karlo Costa.

Resumo—Este artigo modela os campos elétrico e magnético gerados por uma linha de transmissão (LT) de 500 kV em Marabá-PA, utilizando o Método das Imagens. O estudo analisa dois cenários: i) na torre, com a altura máxima dos condutores; ii) no centro do vão, com a altura mínima em relação ao solo, considerando uma faixa de servidão de 60 m. Os resultados são analisados em conformidade com os limites da ICNIRP, abordando as implicações para a segurança humana e o planejamento urbano nas áreas próximas à LT.

Palavras-Chave—Linhas de Transmissão, Campos Elétricos, Campos magnéticos, Método das Imagens, Segurança Eletromagnética.

Abstract—This paper models the electric and magnetic fields generated by a 500 kV transmission line (TL) in Marabá-PA, using the Image Method. The study analyzes two scenarios: (i) at the tower, with the maximum conductor height; and (ii) at the midpoint of the span, with the minimum height relative to the ground, considering a 60-meter right-of-way. The results are evaluated in accordance with ICNIRP limits, addressing implications for human safety and urban planning in areas near the TL.

Keywords—Transmission Lines, Electric Fields, Magnetic Fields, Method of Images, Electromagnetic Safety.

I. INTRODUÇÃO

A expansão urbana próxima a linhas de transmissão (LTs) de alta e extra-alta tensão levanta preocupações quanto aos campos elétrico e magnético gerados por essas estruturas, especialmente em regiões onde a faixa de servidão pode estar sujeita à ocupação irregular. A modelagem desses campos permite avaliar sua distribuição espacial e verificar, em caráter teórico, sua relação com os limites de exposição recomendados por normas técnicas, como a NBR 5422/2024 [1], que define critérios para a delimitação da faixa de servidão e orientações para o planejamento físico das instalações elétricas, e também pela Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP) [2], que estabelece níveis de referência para exposição humana a campos não ionizantes.

As linhas de transmissão de extra alta tensão, como as de 500 kV, demandam atenção especial devido à elevada magnitude dos campos gerados. O controle dos campos elétrico e magnético na faixa de servidão é crucial para evitar descargas corona, interferências eletromagnéticas e riscos de choque. Além disso, a ocupação irregular no entorno dessas linhas pode comprometer a segurança operacional, exigindo avaliações de distâncias mínimas e mitigação de efeitos indesejados. É igualmente relevante destacar os riscos associados a possíveis invasões na faixa de servidão, a fim de prevenir impactos à segurança pública.

Nadson Welkson, Thamyris Evangelista, Dpto. Eng. Elétrica, UNIFESSPA, Marabá-PA, e-mails: nadson.welkson@unifesspa.edu.br, thamyris.silva@unifesspa.edu.br; Karlo Costa, Dpto. Eng. Elétrica, UFPA, Belém-PA, e-mail: karlo@ufpa.edu.br.

Este artigo tem como objetivo principal modelar, por meio do Método das Imagens, um trecho de linha de transmissão (LT) de 500 kV que corta a cidade de Marabá-PA, conhecido como Itacaiúnas Circuito 1 e Circuito 2, com o intuito de obter as magnitudes dos campos elétrico e magnético em seções transversais da linha. A metodologia adotada envolve cálculos baseados na geometria dos condutores, na configuração da fiação nas torres, na disposição das fases e na resistividade do solo.

Os resultados obtidos permitem: (a) verificar a adequação aos limites normativos de exposição; (b) validar modelos simplificados para análise preliminar de campos eletromagnéticos; e (c) subsidiar decisões técnicas sobre o uso do solo no entorno de linhas de alta tensão. Adicionalmente, a metodologia apresentada constitui uma ferramenta acessível para estudos preliminares, podendo ser replicada para outras configurações de linhas de transmissão.

II. DESCRIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Normalmente, os componentes de uma linha aérea de transmissão são subdivididos em [3]:

- 1) Condutores;
- 2) Isoladores (cadeia de isoladores de porcelana ou vidro);
- 3) Estruturas de Suporte;
- 4) Cabos para-raios (cabos de aço colocados no topo da estrutura para proteção contra raios).

A Figura 1 apresenta uma foto da LT analisada e a numeração respectiva destes componentes.



Fig. 1. Foto da torre de transmissão analisada.

A estrutura em estudo consiste em uma torre de transmissão de circuito duplo, configuração amplamente utilizada em linhas de 500 kV para otimização da faixa de servidão, menor impacto ambiental devido à otimização do uso do terreno e maior confiabilidade operacional proporcionada pela redundância de circuitos [4].

Este artigo adota os valores constantes apresentados na Figura 2, que exhibe os dados operacionais de cada circuito de LT em estudo, registrados pelo sistema da subestação.

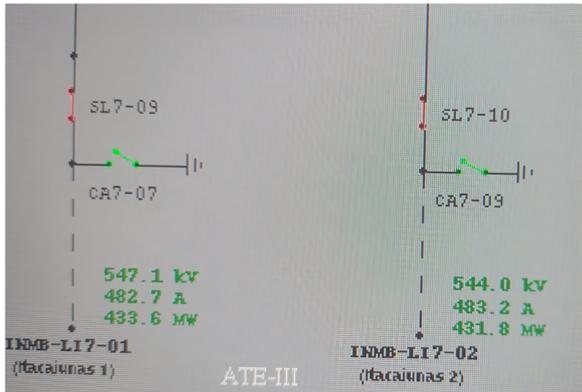


Fig. 2. Dados operacionais da linha de transmissão. Os valores numéricos representam as tensões de linha V_L , correntes de linha $I_L = I_f$ e potência dos dois circuitos.

A. Geometria do Sistema

A linha de transmissão analisada emprega dois circuitos trifásicos paralelos ($N_f = 6$ feixes condutores), com disposição simétrica nos lados esquerdo (fases $\Phi A'$, $\Phi B'$, $\Phi C'$) e direito (fases ΦA , ΦB , ΦC) da torre. Cada circuito possui 3 feixes, sendo cada feixe composto por $N_c = 4$ subcondutores de raio 14.795 mm, arranjados em configuração quadrada com espaçamento de 0.75 m entre si. O sistema totaliza $N = N_f \times N_c = 24$ condutores, individualmente identificados por $k = 1, 2, \dots, 24$, conforme ilustrado na Figura 3.

As coordenadas $(x_c(k), z_c(k))$ dos condutores k são obtidas através de:

$$\begin{cases} x_c(k) = X_{fi} + \Delta X_s \\ z_c(k) = Z_{fj} + \Delta Z_s \end{cases} \quad (1)$$

onde:

- (X_{fi}, Z_{fj}) : coordenadas do centro do feixe i e j ,
- $(\Delta X_s, \Delta Z_s)$: Arranjo quadrado ($\pm 0,375$ m),
- $s = 1, \dots, 4$: Índice do subcondutor no feixe;

A torre possui seis feixes condutores distribuídos simetricamente em dois lados:

- **Lado esquerdo** (feixes 1-3): Posicionados em $X_{fi} = e = -7,0$ m com alturas Z_{fj} de:
 - $j = 1$: $a = 37,17$ m
 - $j = 2$: $b = 29,67$ m
 - $j = 3$: $c = 22,17$ m
- **Lado direito** (feixes 4-6): Posicionados em $X_{fi} = e = 7,0$ m com as mesmas alturas do lado esquerdo, formando pares simétricos Z_{fj} :
 - $j = 4$: $a = 37,17$ m
 - $j = 5$: $b = 29,67$ m
 - $j = 6$: $c = 22,17$ m

A distância horizontal entre centro do feixe dos circuitos é $d = 14$ m ($2 \times |e|$), com três alturas verticais equidistantes: diferença de 7,0 m entre o centro do feixe das fases a e b , e 7,0 m entre o centro do feixe das fases b e c .

No centro do vão entre duas torres, ponto mais baixo da catenária, as alturas dos centros dos feixes são: $a = 25,4$ m (superior), $b = 17,9$ m (médio) e $c = 10,4$ m (inferior), atendendo ao requisito mínimo de segurança em área urbana.

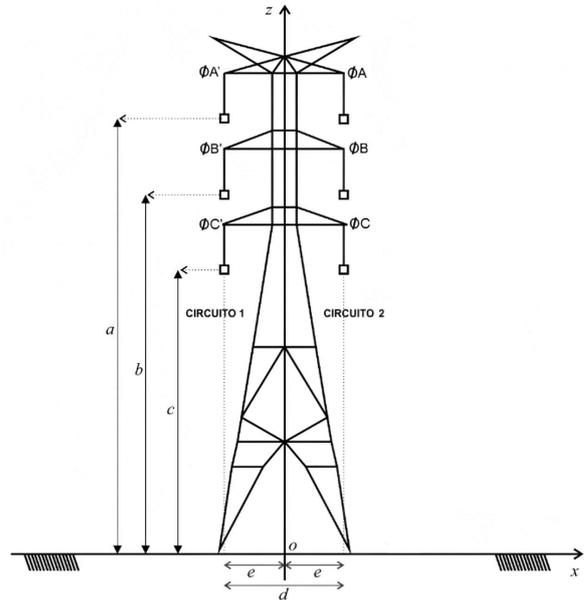


Fig. 3. Representação básica da torre de transmissão analisada.

O modelo considera exclusivamente os condutores energizados, desprezando cabos-guarda e elementos passivos.

III. METODOLOGIA

A. Parâmetros Elétricos

Considerando que o sistema opera em configuração delta (Δ) sem neutro, com tensões de linha V_L equilibradas e sequência de fases ABC , as tensões de fase (V_f) são determinadas a partir do equivalente em estrela (Y) para análise fasorial. A representação das tensões e correntes trifásicas é dada por [5]:

$$\mathbf{V}_f = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[V_L e^{j0}, V_L e^{-j\frac{2\pi}{3}}, V_L e^{j\frac{2\pi}{3}} \right]^T \quad [\text{V}] \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_f = \frac{1}{N_c} \left[I_f e^{j0}, I_f e^{-j\frac{2\pi}{3}}, I_f e^{j\frac{2\pi}{3}} \right]^T \quad [\text{A}] \quad (3)$$

onde, \top denota a transposta do vetor, $V_L = 547,1$ kV (Circuito 1) e 544,0 kV (Circuito 2), $I_f = 482,7$ A (Circuito 1) e 483,2 A (Circuito 2), valores RMS.

Esses fasores são atribuídos aos feixes conforme a conexão trifásica do sistema, respeitando a simetria da linha e considerando que estão com fatores de potência unitários.

B. Método das Imagens

O método das imagens é aplicado na análise de linhas de transmissão para considerar a influência de superfícies condutoras, substituindo-as por fontes fictícias que satisfazem as condições de contorno. Ao assumir a terra como plano condutor ideal, torna-se possível determinar os campos elétrico

e magnético gerados pelos condutores reais e suas imagens, sob a hipótese de que os raios dos condutores são pequenos em relação aos seus espaçamentos.

Esse método permite calcular as capacitâncias próprias e mútuas entre condutores, sendo essencial para a formação das matrizes de impedâncias série e admitâncias *shunt*, fundamentais na modelagem de linhas de transmissão. A Figura 4, adaptada de [6], ilustra o método das imagens.

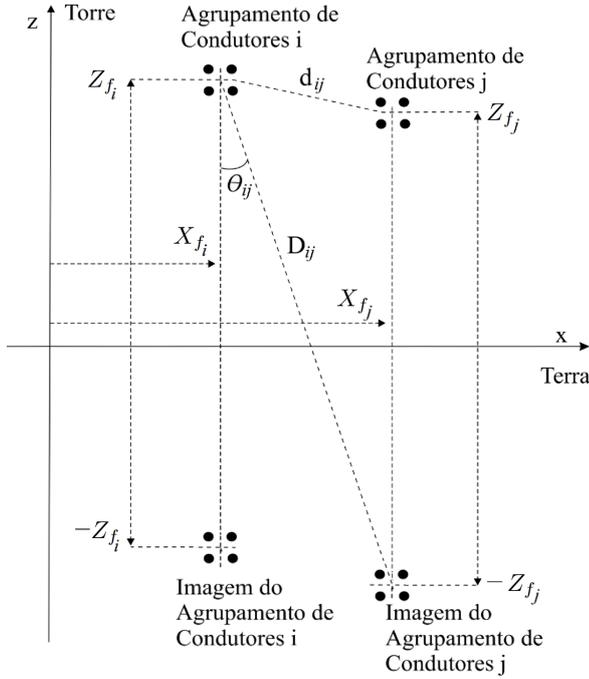


Fig. 4. Ilustração do Método das Imagens para linhas de transmissão.

C. Matriz de Potenciais

A modelagem da interação eletrostática entre os condutores é feita por meio da matriz de potenciais $[P]$. Esta possui dimensão $N \times N$. Os coeficientes de potencial próprio P_{ii} , através do método das imagens, são dados por [7]

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2z_{ci}}{r_i} \right) \quad [\text{m/F}] \quad (4)$$

onde, $r_i = 14,795 \times 10^{-3}$ m corresponde ao raio dos subcondutores e ϵ_0 a permissividade do espaço livre. Já os coeficientes de potencial mútuo P_{ij} entre os condutores i e j são dados por

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad [\text{m/F}] \quad (5)$$

em que D_{ij} é a distância em metros entre um condutor real i e as imagens dos demais condutores reais j :

$$D_{ij} = \sqrt{(x_{ci} - x_{cj})^2 + (z_{ci} + z_{cj})^2} \quad (6)$$

e d_{ij} é a distância em metros entre um condutor real i e os demais condutores reais j :

$$d_{ij} = \sqrt{(x_{ci} - x_{cj})^2 + (z_{ci} + z_{cj})^2}. \quad (7)$$

D. Cálculo de Cargas e Correntes

A matriz de capacitância *shunt* por unidade de comprimento C é obtida como a inversa da matriz de potenciais [6]:

$$[C] = [P]^{-1} \quad [\text{F/m}] \quad (8)$$

em que bastaria multiplicar pelo comprimento em metros para obter a capacitância em Faraday (F). A matriz complexa de cargas Q relativa aos condutores é determinada por:

$$[Q] = [C][V] \quad [\text{C/m}]. \quad (9)$$

em que são usadas as tensões de fase para cada condutor em seu respectivo circuito.

Sob condições de regime permanente, os vetores de corrente e tensão são fasores e se relacionam por:

$$[I] = [Y][V] = j[B_{sh}][V] = j\omega[C][V] \quad [\text{A}] \quad (10)$$

onde, Y é a matriz de admitâncias da linha. Em linhas de transmissão aéreas na frequência de 60Hz, a condutância *shunt* (parte real de Y) é geralmente desprezível, restando apenas a susceptância *shunt*:

$$[Y] \approx j[B_{sh}] = j\omega[C]. \quad (11)$$

em que B_{sh} representa a matriz de susceptância capacitiva por unidade de comprimento em S/m .

Em uma linha de transmissão, modelada pelo circuito π -equivalente, a corrente total é composta pela corrente que flui até a carga e pela corrente nas admitâncias de derivação que representam a capacitância da linha [8]. Assim, a corrente I_f , obtida dos dados operacionais dos circuitos 1 e 2, já incorpora os efeitos de I .

E. Cálculo dos Campos Elétrico e Magnético

O estudo considera uma malha retangular que cobre toda a extensão horizontal da faixa de servidão da linha de transmissão (60 metros de largura) e se estende verticalmente até 45 metros de altura para fins de análise.

Para cada condutor k , os campos são calculados no ponto (x_i, z_j) usando o **método das imagens**. Onde, para o campo elétrico, as componentes de campo são [7]

$$E_{xk} = \frac{Q(k)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{x_i - x_c(k)}{(x_i - x_c(k))^2 + (z_j - z_c(k))^2} - \frac{x_i - x_c(k)}{(x_i - x_c(k))^2 + (z_j + z_c(k))^2} \right] \quad (12)$$

$$E_{zk} = \frac{Q(k)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{z_j - z_c(k)}{(x_i - x_c(k))^2 + (z_j - z_c(k))^2} - \frac{z_j + z_c(k)}{(x_i - x_c(k))^2 + (z_j + z_c(k))^2} \right] \quad (13)$$

Para N condutores, o campo elétrico é a soma das contribuições de todos os condutores. Matematicamente:

$$E_{x,\text{total}} = \sum_{k=1}^N E_{xk}, \quad (14)$$

$$E_{z,\text{total}} = \sum_{k=1}^N E_{zk}, \quad (15)$$

$$|\mathbf{E}_{\text{total}}| = \sqrt{E_{x,\text{total}}^2 + E_{z,\text{total}}^2}. \quad (16)$$

F. Campo Magnético (\mathbf{H})

O campo magnético gerado por linhas de transmissão é afetado pelas correntes de retorno no solo. Considerar o solo como condutor perfeito (resistividade nula) permite a aplicação do método das imagens espelhadas, mas desconsidera sua condutividade finita. Para contornar essa limitação, emprega-se o método das imagens complexas de Deri [9], que ajusta a posição das fontes fictícias com base na resistividade do solo ρ_s . Essa abordagem incorpora a chamada *profundidade complexa de penetração* (p_0) [10], resultando em maior precisão no cálculo do campo magnético:

$$p_0 = \sqrt{\frac{\rho_s}{j\omega\mu_0}} \text{ m} \quad (17)$$

onde, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da rede elétrica, μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre, $\rho_s = 125$ [$\Omega \cdot \text{m}$] (valor médio segunda zona [11]).

As componentes do campo magnético para cada condutor k são calculadas no ponto (x_i, z_j) através de [12] [13]

$$H_{xk} = \frac{I_f(k)}{2\pi} \left[\frac{z_j - z_c(k)}{\{(z_j - z_c(k))^2 + (x_i - x_c(k))^2\}} + \frac{z_j - z_c(k) - 2p_0}{\{(z_j - z_c(k) - 2p_0)^2 + (x_i - x_c(k))^2\}} \right] \quad (18)$$

$$H_{zk} = \frac{I_f(k)}{2\pi} \left[\frac{x_c(k) - x_i}{\{(z_j - z_c(k))^2 + (x_i - x_c(k))^2\}} + \frac{x_i - x_c(k)}{\{(z_j - z_c(k) - 2p_0)^2 + (x_i - x_c(k))^2\}} \right] \quad (19)$$

Para N condutores, o campo magnético é a soma das contribuições de todos os condutores. Matematicamente:

$$H_{x,\text{total}} = \sum_{k=1}^N H_{xk}, \quad (20)$$

$$H_{z,\text{total}} = \sum_{k=1}^N H_{zk}, \quad (21)$$

$$|\mathbf{H}_{\text{total}}| = \sqrt{H_{x,\text{total}}^2 + H_{z,\text{total}}^2}. \quad (22)$$

IV. RESULTADOS

Este artigo avalia os campos elétricos e magnéticos mediante uma abordagem bidimensional em dois cenários distintos:

- **Plano na Torre:** Análise dos campos na região de fixação dos condutores, correspondente à altura máxima, desconsiderando os efeitos da estrutura metálica de sustentação.
- **Centro do Vão:** Análise paramétrica dos campos elétricos considerando múltiplas alturas, com foco na situação crítica de menor distância entre os condutores e o solo, verificada no ponto de maior flecha da catenária, situado no centro do vão.

As Figuras 5 e 6, respectivamente, apresentam o mapeamento bidimensional dos campos elétrico e da densidade de fluxo magnético, bem como suas linhas de campo, no plano da torre. Nessas representações, a coloração indica a intensidade dos campos (conforme a barra de cores), enquanto as linhas sobrepostas correspondem às linhas de campo elétrico ou magnético, conforme o caso.

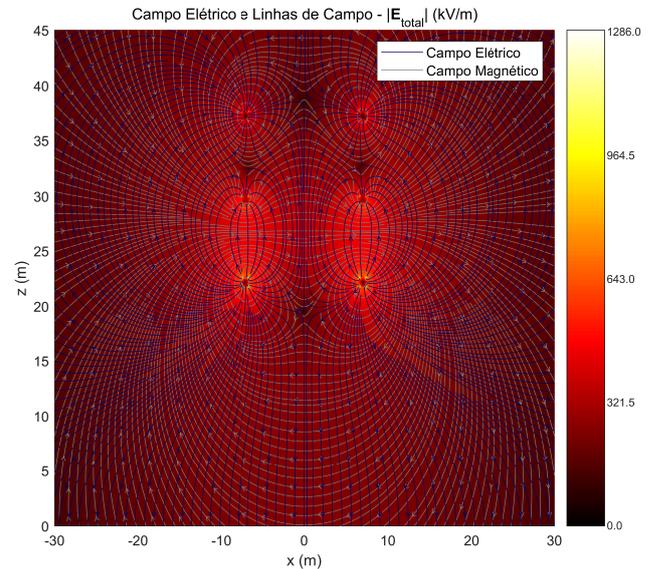


Fig. 5. Campo Elétrico e Linhas de Campo.

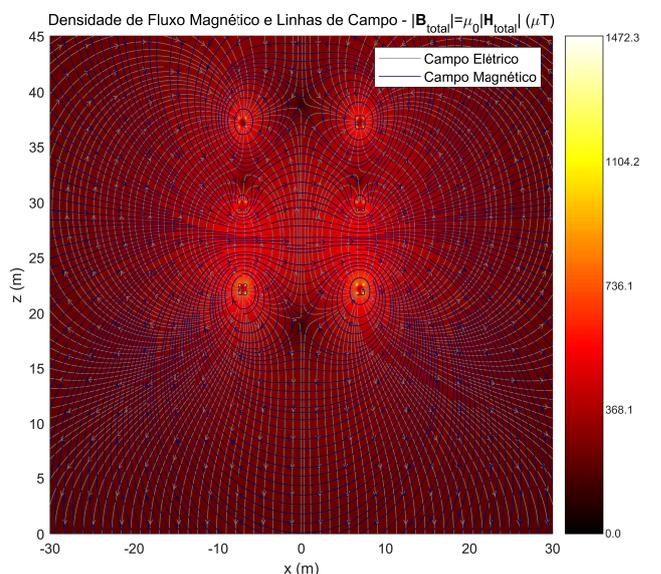


Fig. 6. Densidade de Fluxo Magnético e Linhas de Campo.

Adota-se, em ambos os casos, a faixa de servidão no intervalo de -30 m a $+30$ m como domínio de estudo.

De acordo com a ICNIRP, os campos elétrico e magnético devem ser mantidos abaixo dos níveis de referência para exposição do público em geral, que, para 60Hz, correspondem a 5 kV/m para o campo elétrico e $200\mu\text{T}$ para a densidade de fluxo magnético [2]. Para exposição ocupacional (trabalhadores), os limites são de 10 kV/m e $1.000\mu\text{T}$ na mesma frequência. Aqui, são incluídas as alturas para avaliação da exposição humana, correspondentes à região do coração ($1,5$ a $1,6$ m) e à região da cabeça ou cérebro ($1,8$ a $2,0$ m).

As Figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, os perfis transversais dos campos elétrico e magnético em diferentes alturas (z), no centro do vão entre duas torres, ao longo da faixa de servidão – trecho de maior exposição e cenário mais crítico, por corresponder à altura mínima dos condutores em relação ao solo. Em ambas as figuras, observa-se que os valores máximos dos campos ocorrem nas proximidades dos condutores, com uma redução no centro da LT e à medida que se afasta lateralmente dos feixes. Essa distribuição apresenta comportamento simétrico em torno do centro da LT, devido à configuração simétrica das fases nos braços da torre.

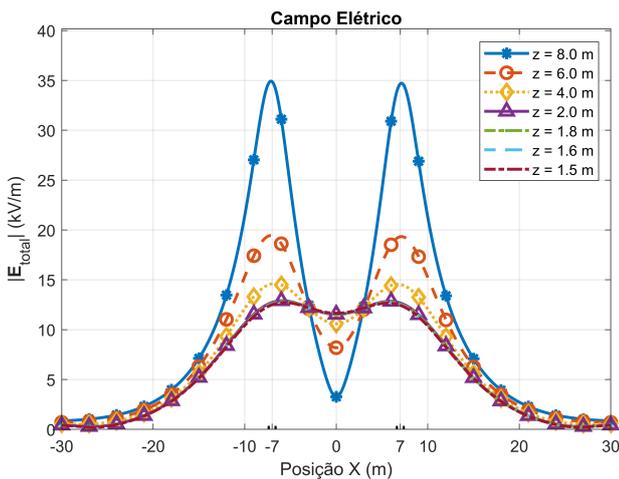


Fig. 7. Campo Elétrico (no centro do vão).

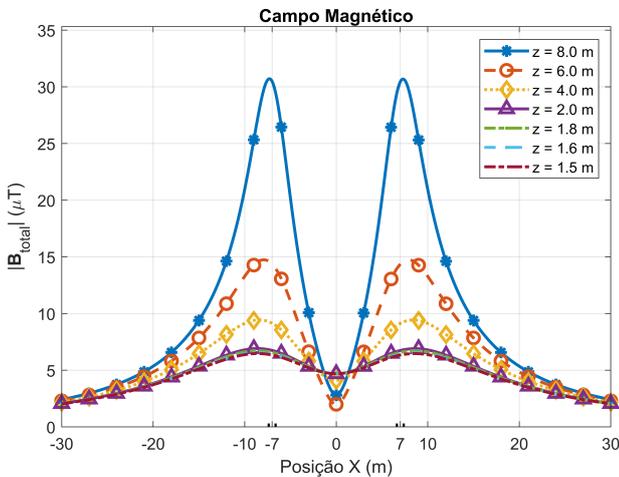


Fig. 8. Densidade de Fluxo Magnético (no centro do vão).

Nota-se, para o campo elétrico, que as alturas entre $z = 1,5$ m e $z = 2,0$ m possuem valores muito aproximados. Nesse

intervalo de alturas, os valores críticos de exposição do público geral (5 kV/m) ocorrem entre $x = -15,0$ m e $x = 15,0$ m, e os valores críticos para exposição ocupacional (10 kV/m) aparecem entre $x = -10,0$ m e $x = 10,0$ m.

Para o campo magnético, observa-se atendimento aos limites de exposição tanto do público geral quanto ocupacional em todas as alturas avaliadas ($200\mu\text{T}$).

É essencial respeitar toda a faixa de servidão, pois, conforme o estudo [14], algumas ocupações irregularmente adentraram esta LT em pontos situados em $x = 17,5$ m, próximo ao limiar de exposição do público geral.

CONCLUSÕES

Os resultados demonstram conformidade com os limites da ICNIRP, com campos elétricos críticos (5 - 10 kV/m) entre $x = \pm 15$ m e $x = \pm 10$ m, respectivamente, enquanto os campos magnéticos permanecem abaixo de $200\mu\text{T}$ em toda a área. A abordagem 2D mostrou-se eficiente para avaliações preliminares de alerta para ocupações irregulares, com resultados coerentes em relação às restrições básicas e níveis de referência.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado e às Pró-Reitorias de Ensino e de Extensão da UNIFESSPA.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5422:2024 - Projeto de linhas aéreas de energia elétrica — Critérios técnicos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- [2] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. *ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)*. Health Physics, v. 99, n. 6, p. 818–836, 2010. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- [3] R. D. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*, 1ª ed., vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- [4] VILELA, P. *Uma proposta de análise técnica para LTs compactas com potência elevada em regiões com topografia acidentada*. Dissertação (Mestrado). UFMG, 2019. <http://hdl.handle.net/1843/30268>.
- [5] A. N. E. I. Ayad, W. Krika, H. Boudjella, F. Benhamida, A. Horch. *Simulation of the Electromagnetic Field in the Vicinity of the Overhead Power Transmission Line*. Ghardaia: Kasdi Merbah University, 2023.
- [6] TLEIS, A. N. D. *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*. 1ª ed. Oxford: Elsevier, 2008.
- [7] SANTOS JR., J. S. et al. *Analysis of the Electric Field of a 500 kV Transmission Line*. In: IEEE/PES CONF., 2010, Porto Velho. Rio de Janeiro: IEEE, 2010. ISBN 978-1-4244-6742-6.
- [8] SAADAT, H. *Power System Analysis*. 1ª ed. New York: McGraw-Hill, 1999. Cap. 5: Line Model and Performance, Seção 5.3: Medium Transmission Line, p. 96–97.
- [9] A. DERI et al. The complex ground return plane: a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 8, pp. 3686–3694, Aug. 1981.
- [10] VELAME, M. R. (2019). *Campos EM em LT via método das imagens*. TCC - UFRB.
- [11] RIBEIRO, R. H. A. *Métodos geoelétricos para pesquisa de cobre em Canaã dos Carajás*. TCC (Geologia) - UNIFESSPA, Marabá, 2021.
- [12] HEILMANN, A.; DARTORA, C. A. *The relation between dielectric breakdown and transported power density in high-voltage transmission lines*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 4, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000400012>
- [13] PIRJOLA, R.; BOTELER, D. *Calculation methods of the electric and magnetic fields at the Earth's surface produced by a line current*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 107, n. A6, p. SMP 9-1–SMP 9-8, 15 jun. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001RS002576>
- [14] SANTOS, M. M. *Análise de campo elétrico de linha de transmissão pelo método das imagens*. TCC (Eng. Elétrica) - UNIFESSPA, Marabá, 2022.