



INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

Título do Trabalho: Cálculo dos Níveis de Campos Magnéticos produzidos por Linhas de Transmissão operando em Regime Permanente.

Autor (es): Paula Carvalho Resende, Gustavo Lobato Campos, Mariana Guimarães Santos.

Palavras-chave: Linha de transmissão, campo magnético, regime permanente, Matlab®.

Campus: Formiga

Área do Conhecimento (CNPq): 3.04.00.00-7 Engenharia Elétrica

RESUMO

As linhas de transmissão são essenciais para transportar energia elétrica aos centros consumidores. Com o aumento pela demanda de energia e o crescimento da população, o número de linhas de transmissão vêm aumentando no país. Por isso, cada vez mais, as linhas de transmissão passam perto dos centros urbanos e industriais. Porém, devido à alta tensão e corrente, campos eletromagnéticos são gerados na faixa de passagem das linhas de transmissão. Existem estudos sobre os efeitos destes campos à exposição humana e nas estruturas localizadas nas faixas de passagem das linhas de transmissão. Diante disso, este projeto propõe o estudo das normas regulamentadoras vigentes no Brasil referentes aos níveis de limite de exposição à campos eletromagnéticos, assim como modelagem, utilizando *software* Matlab®, e cálculo especificamente dos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente, considerando configurações de linhas típicas da região. Após a modelagem, pretende-se comparar os níveis calculados com os níveis presentes em literatura da área.

INTRODUÇÃO:

As linhas de transmissão (LTs) são responsáveis pela transmissão de energia elétrica do sistema elétrico de potência brasileiro que também é composto pela geração, distribuição e comercialização de energia. Importante ainda citar que devido ao contínuo crescimento dos sistemas elétricos mundiais, imposta pela crescente demanda de energia elétrica, o tópico sobre linhas de transmissão são objetos de estudos ao longo dos últimos anos. A predominância da hidroeletricidade na matriz energética nacional, com bacias geograficamente distantes entre si, faz com que as LTs exerçam um papel importante neste sistema, interligando o centro gerador as demais localidades consumidoras no país [1].

Estudos recentes revelam um aumento significativo das exigências feitas pelos órgãos ambientais e pela própria sociedade em relação à segurança das instalações do sistema elétrico. Este aumento deve-se aos efeitos nocivos à saúde humana e devido ao mau funcionamento de equipamentos, especialmente equipamentos que utilizam dispositivos eletrônicos. Esses efeitos podem ser causados em detrimento aos campos eletromagnéticos gerados pelas subestações e linhas de transmissão. [2]

As normas mais atualizadas regulamentam que o campo magnético seja de, no máximo, 83,33 μT para campos magnéticos para o público geral ao longo das faixas de passagem de uma LT [3] – que são corredores ao longo do percurso das linhas de transmissão. Nas faixas de passagem, por definição das concessionárias de energia elétrica, não deve ser construído nenhum tipo de edificação ou moradia, nem tão pouco a plantação de qualquer tipo de cultura. O fato é que alguns estudos estatísticos apontam determinada



relação entre as pessoas que vivem em proximidade às linhas de transmissão de energia elétrica com o desenvolvimento de algum tipo de patologia [2].

Outro problema encontrado pelas concessionárias de energia é no momento da realização de medição, onde há dificuldades para chegar aos locais onde será feita a medição, pois várias delas são realizadas em linhas de transmissão que passam por rotas difíceis de serem encontradas.

Portanto, simulações computacionais para analisar campos magnéticos presentes em diferentes configurações de linhas de transmissão são instrumentos que ajudam e facilitam na verificação dos níveis de campos a fim de garantir segurança para as pessoas e para as instalações próximas das LTs.

METODOLOGIA:

O foco do projeto de pesquisa consistiu no estudo das regulamentações acerca dos campos eletromagnéticos e sobre os mecanismos de geração dos campos eletromagnéticos pelas linhas de transmissão, para em seguida definir a modelagem adequada a ser empregada neste trabalho para a construção da ferramenta computacional no Matlab®. Posteriormente, realizou-se a comparação dos níveis eletromagnéticos calculados com os níveis presentes em literatura da área para validar o algoritmo e verificar se os níveis estão dentro das normas estabelecidas.

As principais normas e leis regulamentadoras brasileiras sobre campos magnéticos baseiam-se na Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP). Porém, todas regulamentações são atualizadas com o passar dos anos.

Feita em 1985, a NBR 5422, sobre Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, estabelece que o valor do campo elétrico ao nível do solo não deve ultrapassar 5 kV/m na faixa de passagem, porém não nivela os campos magnéticos. Por isso, criou-se em 2006, a NBR 15415, para especificar os níveis de campos elétricos e magnéticos de medição e exposição para frequências de 50 Hz a 60Hz. Na NBR 15415, os níveis para exposição do campo magnético do público geral é de 83,33 μT para 60 Hz e 100 μT para 50 Hz. Como atualização da norma, a Lei Federal 11.934/09 e a Resolução Normativa 398 da ANEEL, foram criadas a fim de estabelecer limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos para o público geral e público ocupacional. Para o público geral, o valor limite de campo magnético é de 200 μT em 50 Hz e 60 Hz. Para o público ocupacional, o valor limite de exposição ao campo magnético é de 1000 μT para ambas as frequências.

Depois do conhecimento dos valores limites de exposição aos campos magnéticos, estudou-se as modelagens para empregar na rotina computacional em Matlab®. Todas as análises de campo magnético partiram da Lei de Ampère. Ela estabelece em sua forma integral, que a integral de linha do componente tangencial de densidade magnética, em torno de um caminho fechado é igual a corrente de contorno, envolvida no caminho. Porém, devido às grandes distâncias das LTs, os seus condutores podem ser considerados infinitos, e a densidade magnética pode ser simplificada para a Equação 1.

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi\rho} \hat{a}_\phi \quad \text{Equação 1}$$

Onde I é a corrente que circula pela linha de transmissão, ρ é a distância vertical entre o ponto da fonte e o ponto de observação do campo magnético e \hat{a}_ϕ é o vetor unitário que indica a direção e sentido do campo magnético no ponto de observação.



A Equação 1 somente é válida para o cálculo do campo magnético gerado por uma linha imersa em um único meio, ou seja, infinito em todas as direções. Porém, o solo também tem influência no campo magnético e a inclusão é feita pela aplicação do método das imagens. Esse método é usado para representar as correntes que penetram no solo, as quais influenciam os valores do campo magnético no ponto de observação.

A teoria das imagens estabelece que para uma dada configuração de corrente, próxima a um plano infinito condutor perfeito aterrado, pode ser substituída pela própria configuração de corrente, por sua imagem, e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor.

Por isso, o campo magnético em determinado ponto de observação é o resultado da superposição dos campos magnéticos gerados pelas correntes reais e pelas correntes das imagens, representado do campo magnético é representado na Equação 2.

$$\vec{H}_T = \sum_{I=1}^N \frac{I}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\phi R} + \sum_{I=1}^N \frac{I}{2\pi\rho_I} \hat{a}_{\phi I} \quad \text{Equação 2}$$

Onde N é o número de condutores fases na linha de transmissão e os sufixos “R” representam os componentes do circuito real e “I” a imagem do circuito real. [4]

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Após as definições dos métodos matemáticos para cálculo campos magnéticos, foi desenvolvido em Matlab® um software usado para fazer cálculos e simulações avançadas, ou seja, um algoritmo computacional para calcular campos magnéticos produzidos por linhas de transmissão.

Portanto, é crucial confirmar a veracidade e a confiabilidade dos resultados da ferramenta computacional. Para isso, os resultados são comparados com os resultados computacionais e medições de campos magnéticos, disseminadas na literatura atual.

Os sistemas analisados são apresentados na figura 1. Suas características serão apresentadas em seguida, para posteriormente ser feito a simulação e comparação dos seus comportamentos.

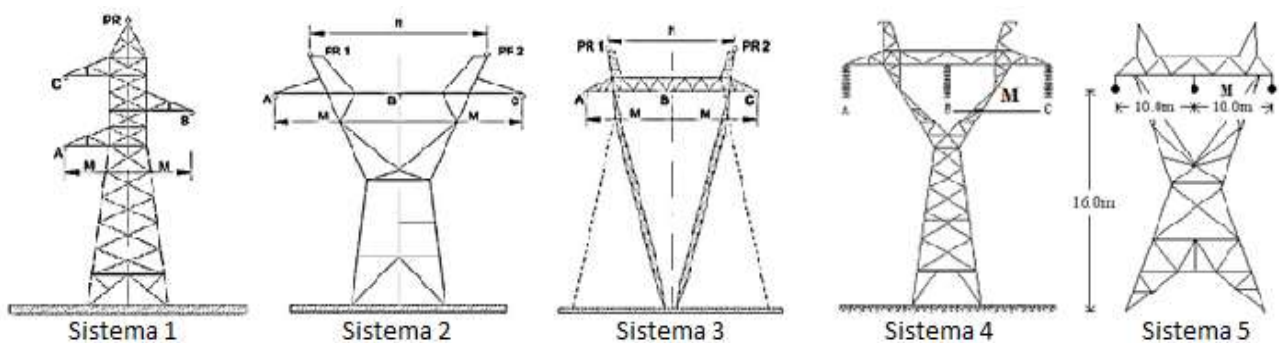


Figura 1 - Sistemas 1, 2 e 3 [4], Sistema 4 [5], Sistema 5 [6].

Sistema 1: Em 2013, o autor [4] realizou um estudo sobre o comportamento magnético da linha de transmissão do sistema 1, Linha de Janaúba – Salinas. A linha de transmissão utilizada pelo autor é trifásica, com tensão 138 kV e corrente de operação média de 146,43 A. A centro da estrutura é adotado como eixo de simetria. Assim, a distância entre o centro e as fases é de 3 metros. A distância do condutor A e em relação



ao solo é de 12,15 metros, da fase B e o solo é de 14,01 metros e a distância da fase C e o solo é de 15,97 metros.

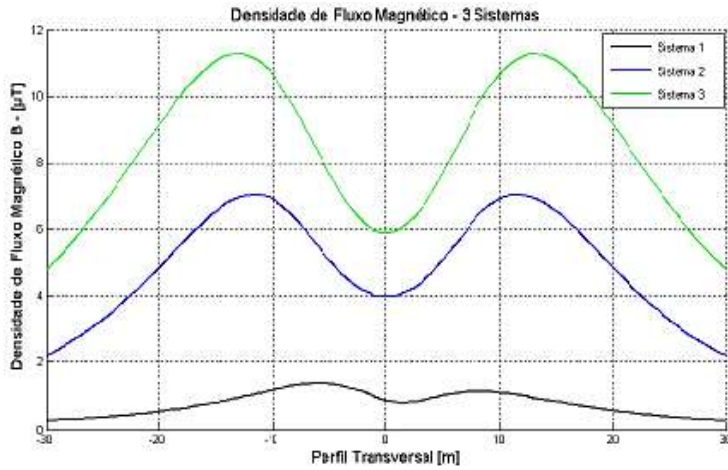
Sistema 2: A linha de transmissão do sistema 2 também foi estudo de [4]. É uma linha que opera a 345 kV e liga sistema Pimenta-Barbacena. A corrente de operação média é de 418,3 A. A fase B é adotada como o eixo de simetria e assim, as fases A e C estão espaçadas da fase B em 9,5 metros. Devido a configuração da estrutura, a distância entre o solo e as fases é a mesma, sendo de 14 metros.

Sistema 3: O autor [4] também fez estudo sobre o comportamento magnético do sistema 3, a linha de transmissão São Gonçalo – Ouro Preto 2. A linha é trifásica, com tensão de 500 kV e corrente de operação média de 837,15 A. Como o sistema 2, a fase B é adotada como referência e a distância entre as fases A e C da fase B é de 10,24 metros. Devido a configuração da estrutura, a distância entre o solo e as fases é a mesma, sendo de 16,53 metros.

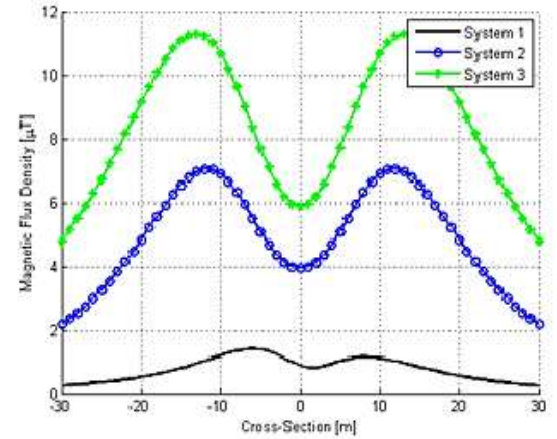
Sistema 4: Em 2005, o autor [5] realizou um estudo sobre o comportamento magnético da linha de transmissão do sistema 4, realizando medições e simulações. A Linha de Neves 1 – Vespasiano 2 utilizada pelo autor é trifásica, com tensão 500 kV e corrente de operação média de 650 A. A fase B é adotada como eixo de simetria e assim, as fases A e C estão espaçadas da fase B em 12 metros. Devido a configuração da estrutura, a distância entre o solo e as fases é a mesma, sendo de 18,06 metros.

Sistema 5: Em 2001, o autor [6] elaborou um estudo com medições e simulações de campo magnético na linha de transmissão Taquaril – Neves. A tensão de operação é de 345 kV e a corrente de operação média de 140 A. A fase B é adotada como eixo de simetria e assim, as fases A e C estão espaçadas da fase B em 10 metros. Devido a configuração da estrutura, a distância entre o solo e as fases é a mesma, sendo de 16 metros.

Com os valores das configurações geométricas e elétricas de todos os sistemas, é possível realizar a simulação do comportamento magnético de cada um, e posteriormente, comparar com os valores simulados e medidos por cada autor. As figuras abaixo mostram o comportamento de cada sistema simulado e/ou medido pelos autores e a simulação feita nesta pesquisa. Os sistemas 1, 2 e 3 foram simulados e calculados utilizando o método das imagens. Porém, as simulações dos sistemas 4 e 5 utilizou-se o método analítico para o cálculo.



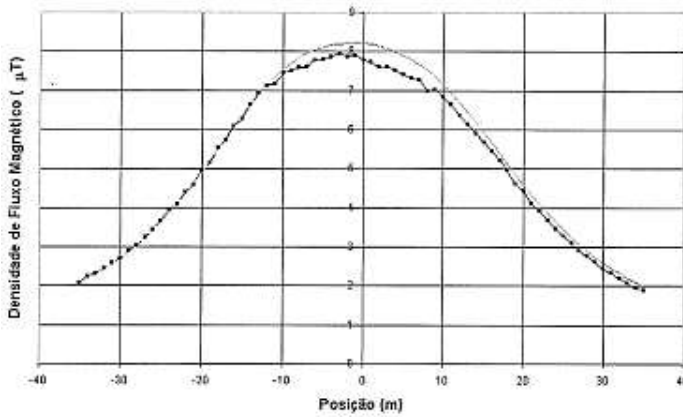
a)



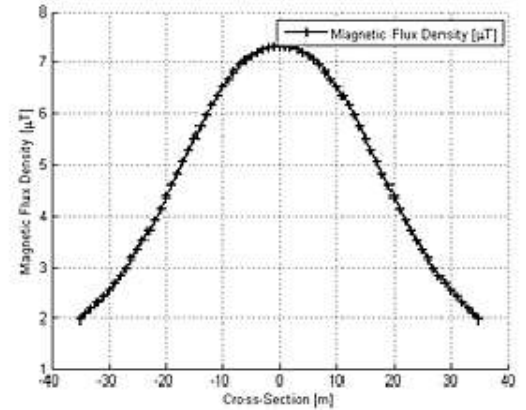
b)

Figura 2 - a) Curvas simuladas por [4] b) Curva simuladas nesta pesquisa.

Perfil Transversal da Densidade de Fluxo Magnético



a)



b)

Figura 2 - a) Curva simulada e medida por [5] b) Curva simulada nesta pesquisa.

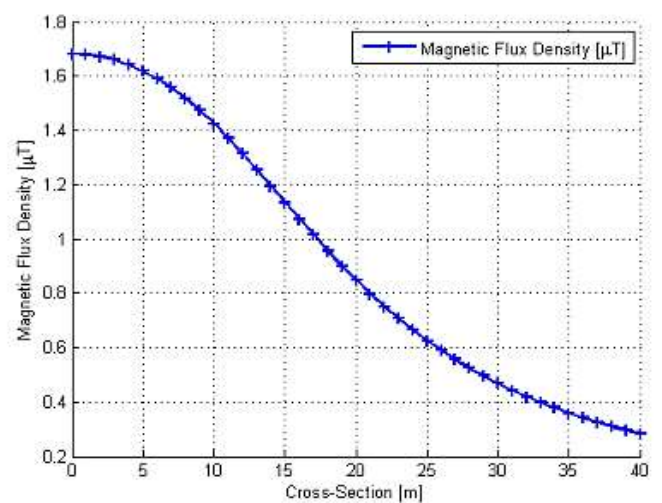
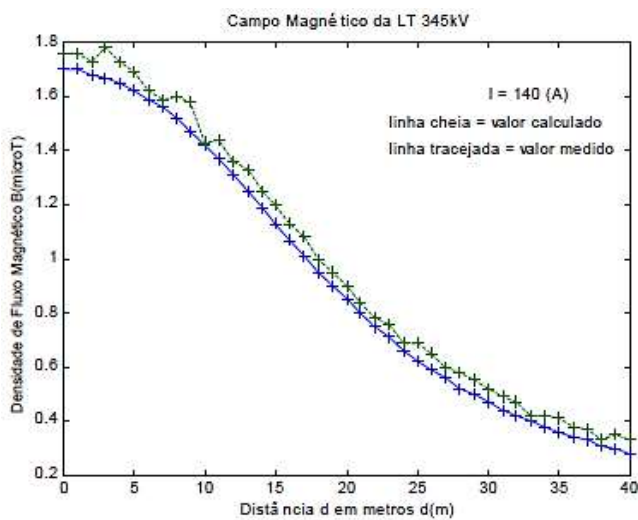


Figura 4 - a) Curva simulada e medida por [6] b) Curva simulada nesta pesquisa.

Análises individuais de cada sistema:

Sistemas 1, 2 e 3: Como pode-se observar na figura 2, os sistemas 1, 2 e 3 foram simulados simultaneamente no mesmo gráfico como o autor [4] fez em sua pesquisa. Para melhor comparação, os sistemas também foram simulados no mesmo gráfico nesta pesquisa. Os cálculos tanto do autor quanto desta pesquisa foram feitos utilizando o método das imagens, considerando o efeito do solo sobre o campo magnético resultante. Os resultados foram satisfatórios, onde não houve diferença entre nenhum ponto das curvas. Isso pode ter acontecido devido à simulação, onde não há espaço para erros, uma vez que os valores de entrada e formulações utilizadas foram as mesmas.

Sistema 4: A análise e cálculo utilizados para a simulação do sistema 4 partiram do método analítico. Como pode-se observar na figura 3, o comportamento das três curvas, medida e simulada pelo autor [5] e a curva simulada nesta pesquisa, é igual. Os valores simulados também não obtiveram erros, pois os valores utilizados foram iguais. Porém, em relação à medição do autor e a simulação nesta pesquisa, houve uma diferença de -6,15% na posição zero. Este tipo de variação pode ocorrer por vários motivos. Um deles, é que a corrente de operação no momento da medição pode variar, devido à instabilidade da linha. Efeitos físicos também podem variar, como a altura média da linha, devido ao vento ou temperatura no local.

Sistema 5: A análise do sistema 5 é similar ao sistema 4. A figura 4 mostra como o comportamento da curva medida e simulada por [6] e as curva simulada nesta pesquisa é igual. Porém, os valores medidos por [6] e valores simulados nesta pesquisa foram diferentes. Na posição horizontal zero, por exemplo, a diferença foi de -8,62%. Os motivos para essa variação podem ser os mesmos citados para o sistema 4.

Análises gerais:

Baseando-se em todos os cálculos dos campos magnéticos simulados, pode-se observar algumas conclusões gerais:

- A adição do solo no cálculo altera o comportamento das curvas mesmo considerando um condutor elétrico perfeito.
- Os campos magnéticos são intensificados com o aumento da corrente.
- O campo magnético também é sensível à geometria da estrutura e muda o seu comportamento.
- Os valores dos campos magnéticos não ultrapassam os valores estabelecidos pelas normas.
- As medições podem variar das simulações devido a efeitos físicos e elétricos na hora da medição.

Assim, a precisão e a confiabilidade do algoritmo computacional desenvolvido em Matlab®, apesar de pequenos erros, torna valores e comportamento dos campos magnéticos em uma linha de transmissão facilmente disponíveis, sem a necessidade de medição em campo.

CONCLUSÕES:



Para desenvolver um programa computacional de campos magnéticos é preciso conhecer suas características e estudar os mecanismos de geração de campos eletromagnéticos pelas linhas de transmissão.

Depois desta análise, foi possível modelar o campo magnético para uma linha de transmissão com alguns pressupostos apresentados na metodologia de cálculo. Assim, desenvolveu-se um algoritmo computacional, em Matlab®, para calcular o campo magnético de uma linha de transmissão.

A validação dos resultados do campo magnético é feita através da comparação dos resultados de medição e cálculo computacional com a literatura presente na área. Através de gráficos e tabelas numéricas provou a confiabilidade da ferramenta computacional.

Algumas análises podem ser feitas a partir dos resultados. Por exemplo, os valores dos campos magnéticos simulados não excedem os níveis de referência estabelecidos pelas regulamentações. Isso mostra que os públicos geral e ocupacional não precisam se preocupar com as patologias recorrentes dos campos magnéticos das LTs em questão. É possível também perceber que os resultados têm erros baixos, podendo assim substituir as árduas medições pelas simulações computacionais.

Finalmente, o algoritmo computacional Matlab® apresentado nesta pesquisa é versátil e confiável, uma vez que pode analisar qualquer geometria e característica elétrica de uma linha de transmissão com o mínimo de erros nos resultados finais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] CAMPOS, Odette Lima. **Estudo de caso sobre impactos ambientais de linhas de transmissão na Região Amazônica**. BNDES Setorial, n. 32, p. 231-266, set. 2010.
- [2] DA SILVA, H. M. O. **Linhas de transmissão de energia elétrica: Estudo sobre compatibilidade eletromagnética**. 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado em Educação) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2012.
- [3] NBR-15415, **Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz**, ABNT, Outubro, 2006.
- [4] VIEIRA, Hugo Rodrigues. **Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. 2013. 158p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São João del-Rei, 2013.
- [5] GUIMARÃES, German Edson. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Belo Horizonte, 2005.
- [6] RAMÍREZ, Jaime Arturo. **Campos Eletromagnéticos devido a Sistemas de Energia Elétrica**. Impreso: Efeitos Biológicos Devidos à Ação de Campos Eletromagnéticos. São Paulo, 2001.

Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

- Artigo 1 – “Estudo sobre as principais regulamentações dos campos eletromagnéticos na operação em regime permanente de linhas de transmissão”. Submetido em revista RCT – Revista Ciência e Tecnologia e aguardando avaliação.



- Artigo 2 – “Calculation Methodology and Computational Analysis of the Magnetic Field of Transmission Lines Operating at Steady State”. Em avaliação para congresso CEEL em Uberlândia.