



## INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

**Título do Trabalho:** Cálculo dos níveis de campos elétricos produzidos por linhas de transmissão operando em regime permanente.

**Autor (es):** Cíntia Arantes Silva / Gustavo Lobato Campos / Mariana Guimarães dos Santos

**Palavras-chave:** Campo elétrico, linhas de transmissão, Matlab®, Maxwell, teorema da superposição.

**Campus:** Formiga

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

## RESUMO

Este trabalho propõe o cálculo dos níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente no nível do solo. O cálculo e a avaliação de tais níveis é de fundamental importância, uma vez que estão diretamente associados a aspectos de segurança pessoal. A metodologia para o cálculo dos níveis de campos elétricos é desenvolvida a partir das equações de Maxwell associadas ao teorema da superposição e a um método numérico de simplificação de soluções analíticas. O programa foi desenvolvido no *software* Matlab®, e permite o cômputo dos níveis de campos elétricos gerados por diversas configurações de linhas de transmissão. A validação da ferramenta computacional desenvolvida é realizada por meio de comparação com outras referências publicadas.

## INTRODUÇÃO:

A demanda por energia elétrica vem crescendo constantemente desde o começo do século XX, devido tanto ao aumento da população quanto ao crescente acesso dessa população a equipamentos eletroeletrônicos. Atualmente a maneira mais eficiente de levar energia do ponto de geração aos consumidores finais é por meio de linhas de transmissão (LT's) que são componentes fundamentais do Sistema Elétrico de Potência. Definem-se linhas de transmissão como sistemas físicos que transportam um sinal elétrico entre um gerador e uma carga, através de um campo eletromagnético [1].

As linhas de transmissão são classificadas de acordo com o seu nível de tensão que é escolhido em função de alguns fatores como, por exemplo: a potência a se transportar, o comprimento dessa linha e o custo para sua instalação. No sistema de transmissão, as LT's possuem normalmente, níveis elevados de tensões visando a redução da perda de energia na transmissão. Em consequência disso, são gerados níveis de campos elétricos também elevados, uma vez que estes estão diretamente relacionados aos níveis de tensões das linhas. Atualmente, de acordo com normas existentes os níveis para transmissão em corrente alternada são: 750 kV, 500 kV, 440 kV, 345 kV e 230 kV, e para sub transmissão tem-se 138kV e 69kV [2].

A preocupação com a exposição da população a níveis de campos elétricos e magnéticos elevados é avaliada por [3, 4]. No Brasil, esta exposição torna-se ainda mais preocupante porque devido a problemas geográficos, econômicos, ou sociais, algumas linhas de transmissão passam muito próximas a áreas residenciais ou com grande circulação de pessoas e animais. Os níveis de campos elétricos e magnéticos aos quais as pessoas podem estar submetidos são regulamentados por normas nacionais e internacionais



[5], [6]. Assim, este artigo pretende, além de calcular os níveis de campos elétricos gerados, avaliar se os mesmos estão adequados às normas vigentes.

A modelagem matemática para o cálculo do campo elétrico deve levar em consideração a natureza vetorial desta grandeza. O princípio fundamental do eletromagnetismo afirma que cada carga individual cria um campo elétrico, de forma tal que as linhas de campo saem das cargas positivas e chegam às negativas, sendo este campo capaz de gerar forças sobre as cargas elétricas sob sua influência. Pode-se ainda afirmar que o campo elétrico local (em um determinado ponto) é dado pela soma vetorial dos campos elétricos gerados por todas as cargas existentes, e o mesmo decresce com o quadrado da distância da fonte [7]. Assim, o campo elétrico produzido por uma linha de transmissão é função dos seguintes parâmetros:

- **Tensão da linha:** Quanto maior a tensão, maior o campo elétrico;
- **Altura dos condutores:** Condutores mais baixos resultam em um nível maior de campo elétrico;
- **Configuração e número de condutores:** Influenciam a taxa de decaimento do campo elétrico em função da distância em relação à linha;
- **Presença de objetos próximos:** Objetos próximos ao ponto de medição, como árvores e estruturas metálicas, interferem na medição do campo elétrico.

O campo elétrico está diretamente associado à tensão de operação da linha e, visto que esta apresenta pequenas oscilações, pode-se dizer que o campo elétrico é praticamente constante ao longo do tempo [8].

Os limites máximos de campos elétricos, gerados por linhas de transmissão de 60 Hz, adotados pela OMS – Organização Mundial da Saúde – para a exposição ao público em geral, com base nas recomendações da ICNIRP [6] – é de 4,17 kV/m. A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, estipula que o valor máximo do campo elétrico, para instalações em 60 Hz, seja de 4,17 kV/m para o público geral e 8,33 kV/m para o público ocupacional [5].

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de se desenvolver uma modelagem computacional capaz de calcular os níveis de campo elétrico (ao nível do solo) gerados por quaisquer sistemas de transmissão operando em regime permanente, para se avaliar se os níveis encontrados estão dentro dos níveis regulamentados pelos órgãos nacionais e internacionais.

## METODOLOGIA:

Inicialmente foi feito um estudo do Estado da Arte abordando o problema eletromagnético das linhas de transmissão (LT's). Avaliou-se a interferência eletromagnética pelos acoplamentos gerados pelo campo elétrico nos dois regimes de operação: Regime permanente e Regime Transitório. O estudo foi necessário para a definição da modelagem ideal a ser utilizada neste trabalho que seria o estudo em linhas de transmissão operando em regime permanente. Mas para que este estudo fosse possível, primeiramente teve-se que realizar uma revisão bibliográfica das LT's (histórico, composição, princípio de funcionamento, etc.).

Logo após, realizou-se o estudo das formas analíticas de se realizar os cálculos dos níveis de campo elétrico, produzidos por uma linha de transmissão. Primeiramente precisou-se manipular a Terceira Equação de Maxwell, conhecida como Lei de Gauss e aplicou-a na configuração de superfície gaussiana de uma linha de transmissão (Linha infinita de carga), uniformemente distribuída com a densidade linear de carga ( $\rho_L$ ) e realizou-se a dedução da formulação da Lei de Gauss, para assim determinar o campo elétrico  $\vec{E}$ , conforme mostra a Equação 1.

$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho} \hat{a}_\rho \quad (1)$$



Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo,  $\hat{a}_\rho$  é o vetor unitário que fornece a direção e sentido do campo elétrico,  $\rho$  é a distância vertical entre a distribuição de carga e o ponto de observação P. Contudo, para realizar o cálculo do campo elétrico, é necessário transformar o sistema físico real, compostos por 2 meios semi-infinitos (ar e solo), em um sistema equivalente composto por apenas 1 meio infinito (ar). Esta transformação é possível com a aplicação do método das imagens (MI), que substitui o efeito do solo por condutores imagens posicionados de forma simétrica em relação aos condutores reais, pois como a superfície do solo altera o campo elétrico da LT, o MI estabelece que em uma dada configuração formada por uma carga próxima a um plano infinito, este plano pode ser submetido pela própria imagem das cargas com sinal oposto, assim considera-se o solo como um condutor elétrico perfeito ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) [7].

Considerando o sistema sob estudo como linear utiliza-se o teorema da superposição para o cálculo do campo elétrico total no ponto de observação P, ou seja, o campo elétrico produzido por todos os condutores do sistema, descrito pela Equação 2.

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^{N_{cond}} \rho_{LK} \left( \frac{\hat{a}_{RK}}{\rho_{RK}} - \frac{\hat{a}_{IK}}{\rho_{IK}} \right) \quad (2)$$

Onde  $N_{cond}$  é o número de condutores do sistema e as nomenclaturas R e I são referentes aos condutores reais e imagens. Contudo, ainda falta determinar as distribuições de carga, previamente desconhecidas, em todos os condutores. Esta determinação é feita com o auxílio do método de simulação de carga (MSC) [9]. A maior parte dos sistemas de transmissão de alta tensão, possuem uma geometria muito complexa, o que praticamente inviabiliza soluções analíticas para o cálculo do campo elétrico. Um dos métodos mais utilizados que proporciona a resolução do problema em questão, é o MSC, que envolve a solução de uma quantidade relativamente reduzida de equações lineares, em um tempo computacional curto, já que realiza a substituição das distribuições de cargas contínuas reais sobre a superfície dos condutores por um conjunto discreto de distribuições de cargas fictícias, que respeitam as condições de contorno do problema [10], conforme ilustra a Equação 3.

$$[P] = [\rho_L] \cdot [V] \therefore [\rho_L] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (3)$$

Solucionando (3), através do conhecimento do vetor de tensões [V] que correspondem aos fasores de tensão dos condutores do sistema, da matriz de coeficientes de potenciais de Maxwell [P] é possível obter as densidades lineares de carga a superfície de cada condutor real ( $\rho_L$ ) e assim, é possível então encontrar o campo elétrico  $\vec{E}$  gerado por uma linha de transmissão, com (2).

A ferramenta computacional desenvolvida utiliza a metodologia de cálculo descrita acima e permite o cômputo do campo elétrico para diferentes configurações de linhas de transmissão. E a mesma foi validada através da comparação com sistemas de linhas de transmissão existentes nas literaturas.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Após a definição das metodologias adotadas para o cálculo do campo elétrico, escolheu-se os sistemas sob estudo e assim através da elaboração da rotina computacional realiza-se as simulações a fim de analisar



e comparar com os resultados obtidos pelos autores. Os sistemas utilizados podem ser vistos na Figura 1 e estão descritos a seguir.

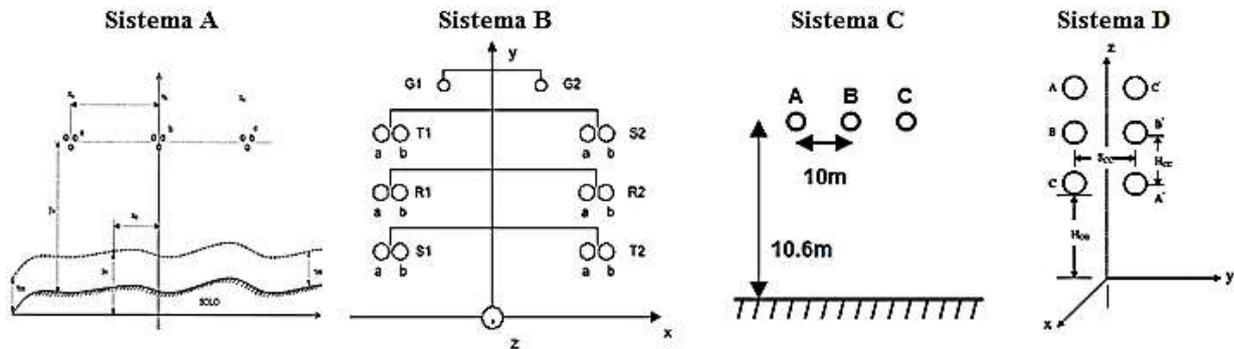


Figura 1: Configurações geométricas dos sistemas reais utilizados no estudo.

**SISTEMA A:** Em 2005, Guimarães [11] realizou medições e simulações computacionais de níveis de campo elétrico gerados por uma linha de transmissão de 500 kV, circuito simples com três condutores por fase, configuração horizontal, com as fases a uma distância de 12 m do eixo de simetria e com alturas de 12,5 m em relação ao solo, como mostra a Figura 1.

**SISTEMA B:** Em 2000, Deschamps [12] e outros fizeram medições do perfil transversal de campo elétrico, a 1 m do solo, de uma linha de transmissão de 400 kV, circuito duplo com dois subcondutores por fase. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases são de 8 m e as alturas das fases em relação ao solo T1, R1, S1, S2, R2 e T2 são de: 45 m, 37.5 m, 30 m, 45.5 m, 37.5 m e 30 m, respectivamente. As distâncias dos cabos para-raios entre o eixo de simetria são de 6m e altura são de 52.5 m, como ilustra a Figura 1.

**SISTEMA C:** Em 1982, em *Electric Power Research* [10], foram desenvolvidas várias simulações computacionais para o cálculo de níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão de diversas configurações de linha. A configuração utilizada nesta comparação é uma linha de 525 kV, de configuração horizontal e de circuito simples com três subcondutores por fase. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases são de 10m e as alturas das fases em relação ao solo HA, HB, HC são de: 10.6 m. Os detalhes da disposição dos condutores podem ser vistos através da Figura 1.

**SISTEMA D:** Em 2007, Ismail [13] apresentou o resultado de uma pesquisa que analisa o perfil transversal de campos elétricos gerados por distribuições de cargas de uma linha de transmissão de circuito duplo de 275 kV, com quatro subcondutores por fase. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases são de 8.8m e as alturas das fases (A, B, C, A', B' e C') em relação ao solo são: 26 m, 17 m, 8 m, 8 m, 17 m e 26 m, respectivamente, simbolizando um sistema de baixa reatância. Sendo está típica do sistema de transmissão do Kwait, ilustrada pela Figura 1.

Utilizando os dados das configurações dos sistemas sob estudo apresentados acima, foram realizadas as simulações na rotina computacional desenvolvida neste artigo e observou-se que:

- **SISTEMA A:** A Figura 2 ilustra os resultados medidos e calculados por [11] e os obtidos neste artigo através da ferramenta computacional desenvolvida. O valor máximo de campo elétrico encontrado



pela ferramenta desenvolvida foi de 8.05 kV/m, sendo que o valor máximo encontrado por [11] para a altura equivalente dos condutores de 12.5 m é de 7.4 kV/m. Assim a diferença máxima percentual encontrada na comparação é de 8.8%.

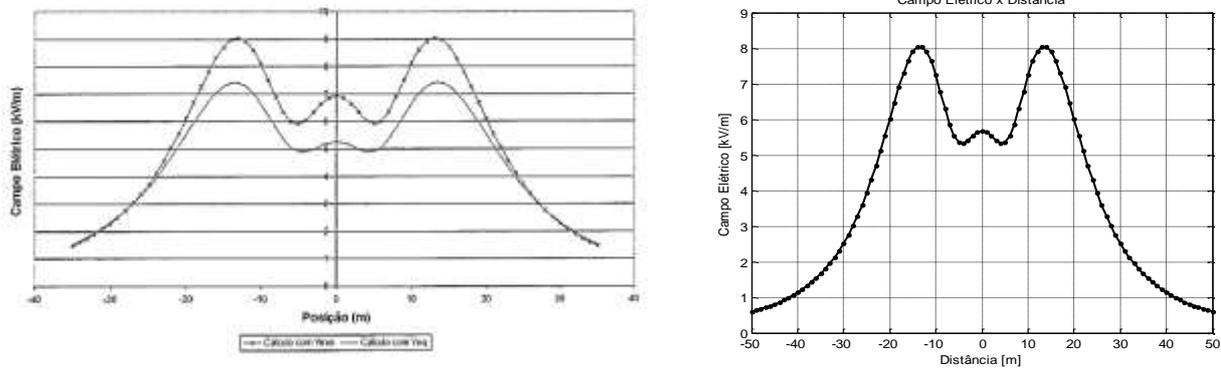


Figura 2: i) Valores de campo elétrico obtido por [11]; ii) Perfil de campo elétrico obtido pelo programa computacional.

- **SISTEMA B:** A Figura 3 mostra os resultados medidos e calculados em [12] e os obtidos por este artigo. A diferença máxima percentual encontrada na comparação é de somente 0.76%. Pois o máximo valor de campo elétrico encontrado por [12] é de 2.60 kV/m e o valor obtido pela ferramenta desenvolvida foi de 2.62 kV/m.

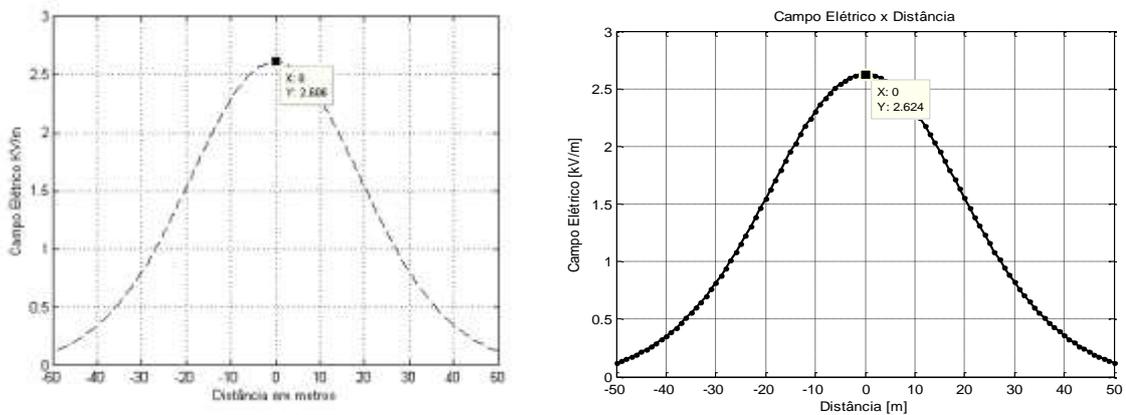


Figura 3: i) Perfil de campo elétrico apresentado por [12]; ii) Perfil de campo elétrico obtido pelo programa computacional.

- **SISTEMA C:** Analisando a Figura 4, verifica-se que o valor máximo de campo elétrico encontrado por [10] é de 8.8 kV/m e o valor obtido pela ferramenta desenvolvida foi de 8.79 kV/m. Assim apresentam uma diferença máxima percentual de somente 0.1%.

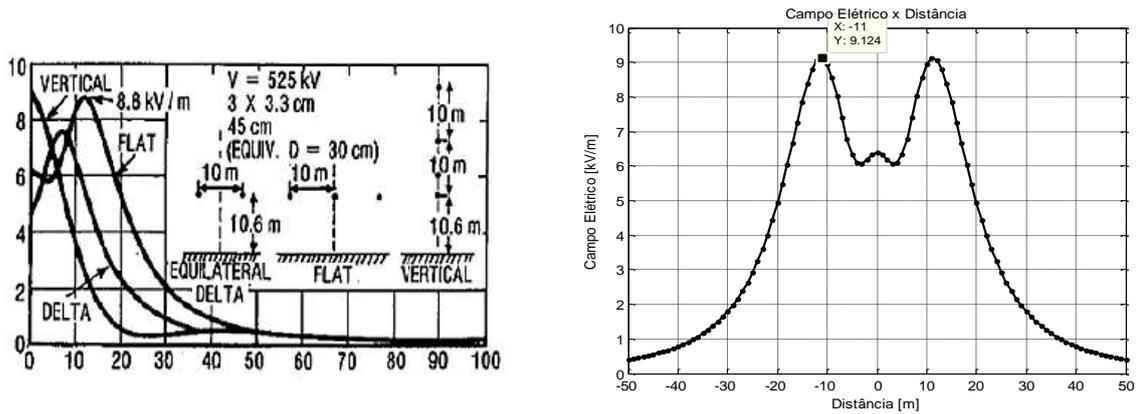


Figura 4: i) Perfil de campo elétrico obtido por [10]; ii) Perfil de campo elétrico obtido pelo programa computacional.

- **SISTEMA D:** A Figura 5 ilustra o resultado de campo elétrico obtido por [13] onde o valor máximo de campo apresentado é de 10.2 kV/m para a configuração de baixa reatância, e o resultado obtido por este artigo que obteve o valor máximo de campo elétrico para a mesma configuração de 10.58 kV/m. Observa-se que a diferença máxima percentual entre as curvas é de somente 3.7%.

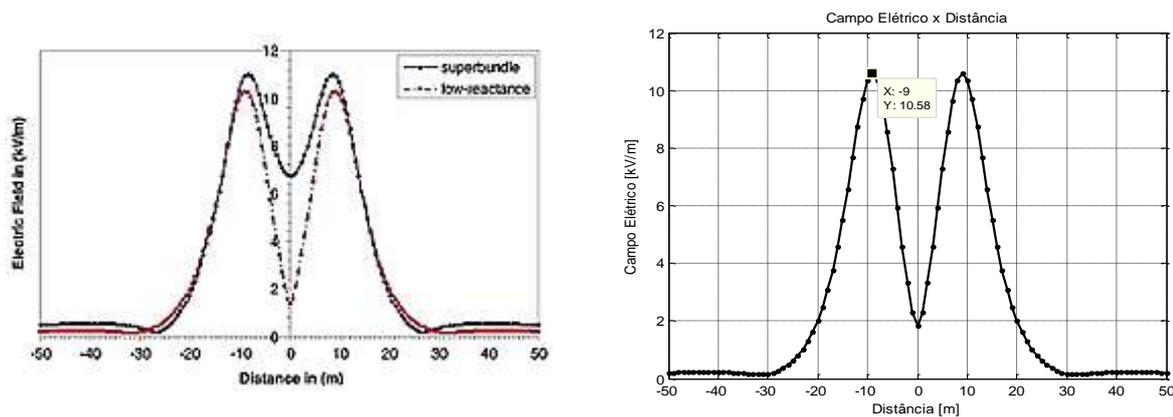


Figura 5: i) Perfil de campo elétrico obtido por [13]; ii) Perfil de campo elétrico obtido pelo programa

## CONCLUSÕES:

O presente artigo apresenta cálculos dos níveis de campo elétrico para diversos sistemas da literatura. Tais cálculos são realizados por meio de um algoritmo desenvolvido no *software* Matlab® e utilizam, como base da metodologia, às formulações de Maxwell juntamente com o método de simulação de carga (MSC), o método das imagens e o teorema da superposição. A validação da metodologia desenvolvida para cálculo do campo validou-se por meio da comparação com outras referências apresentadas na literatura. Para todos os sistemas observou-se que os perfis transversais obtidos seguiram o mesmo comportamento da sua referência e apresentaram uma diferença máxima percentual de 8.8%.

Os níveis de campo elétrico calculados para os sistemas A, C e D na região da faixa de passagem das linhas, apresentam valores superiores aos estabelecidos pelas normas referentes ao público em geral. Os níveis encontrados que excederam os limites estabelecidos para o público ocupacional foram os sistemas C e D. Nestes casos, uma solução seria a adequação da configuração geométrica dos sistemas visando uma redução de tais níveis. Entretanto, em situações reais, esta é uma alternativa inviável e faz-se necessário um



controle mais rigoroso da região de faixa de passagem, para evitar a circulação de pessoas ou animais e a construção de quaisquer estruturas físicas. Sendo assim, evidencia-se a importância da aplicação de algoritmos de simulações computacionais na fase de projeto das LT's, com o intuito de atender os níveis recomendados de campo elétrico gerado pelas mesmas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] COSTA, Leonardo Aquino; MONTEIRO, Vinicius Barros. **Minimização do campo magnético em linhas de transmissão**. Disponível: <ftp://labattmot.ele.ita.br/ele/santos\_dias/Leitura/t3.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.
- [2] PEREIRA JUNIOR, Carlos Antônio. **Análise do transitório eletromagnético em linhas de transmissão**. 2013. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Goiás, 2013.
- [3] MORENO, R. F. **Campos Eletromagnéticos e Saúde Humana: O fato e o mito**. XVIII SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 18 Outubro 2005.
- [4] KUSTER, Álvaro Claudino. **Avaliação de campo eletromagnético em regiões densamente povoadas**. 2011. 96 f. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), 2011.
- [5] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 616/2014, de 01 de julho de 2014.
- [6] ICNIRP, “*Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*,” International Commission on Non-ionizing Radiation Protection Technical Report, 2001.
- [7] SADIKU, M. N. O. **Elementos do Eletromagnetismo**: Bookman, 2004.
- [8] LABEGALINI, P. R; LABEGALINI, J. A; FUCHS, R.D; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2ed. São Paulo, 1992. 528 f.
- [9] SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. A **Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields**. IEEE, 4 Dezembro 1973. 1660-1668.
- [10] Electric Power Research Institute (EPRI). **Transmission Line Reference Book - 345kV and Above**. Estados Unidos: General Electric Company, 1987.
- [11] GUIMARÃES, G. E. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. Belo Horizonte – MG. Dissertação de Mestrado, 2005.
- [12] DESCHAMPS, F. **Technical guide for measurement of low frequency electric and magnetic fields near overhead power lines**. Electra, 243, n. pp. 22-39, 2000.
- [13] ISMAIL, H. M. **Effect of Oil Pipelines Existing in an HVTL Corridor on the Electric-Field Distribution**. IEEE Transactionson Power Delivery, Outubro 2007. 2466-2472.

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

- Artigo 1 – “Análise conceitual de linhas de transmissão operando em regime permanente senoidal”. Submetido em revista da área e aguardando avaliação.
- Artigo 2 – “Numerical Calculations of Electric Fields Produced by Transmission Lines Operating in Steady State”. Em avaliação para congresso da área.