

TÉCNICA DE MITIGAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO ORIGINADO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS

Cristhian Nascimento¹

Eduardo H. Ferroni²

Guilherme E. F. B. Carvalho¹

Hugo R. Viera²

Lucas D. S. Ortiz¹

Luís Gustavo M. Nunes¹

Renato M. Lemos¹

RESUMO

Este artigo elabora um estudo a fim de se determinar um arranjo ideal de fases em linhas de transmissão aéreas de circuitos duplos através de uma consistente modelagem eletromagnética e posterior simulação em programa adequado, de maneira que se possa determinar o menor valor de campo magnético resultante a certa altura de acordo com as normas em vigência. Os resultados são apresentados na forma de gráficos e tabelas.

Palavras-chave: Arranjo ideal de fases. Linhas de transmissão. Campo magnético.

¹ Graduandos em Engenharia Elétrica pelo Grupo Educacional Unis.

² Professores do Grupo Educacional Unis. Mestres em Engenharia Elétrica pela UFSJ. ferroni@unis.edu.br e hugo.vieira@unis.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica no Brasil compõe-se de geração, transmissão, distribuição e comercialização. Como a forma de geração de energia mais utilizada é através de hidrelétricas, devido às condições geográficas e hídricas favoráveis, as linhas de transmissão percorrem um vasto território, pois muitos dos grandes centros consumidores estão distantes das referidas usinas.

Devido às altas tensões e correntes que transitam nestas linhas há a geração de campos magnéticos. Tendo em vista que estes campos são nocivos a seres vivos e equipamentos, faz-se necessária uma aplicação de normas e estudos a fim de minimizar tais danos ao se projetar e construir linhas de transmissão, como a aplicação de faixas de servidão, a qual proíbe a construção de qualquer estrutura. De acordo com CPFL (2007), as linhas de transmissão de 69, 88 e 138 kV possuem uma faixa de passagem de 30 metros (15 metros para cada lado). Para linhas de transmissão com tensões de 34,5 kV, a faixa de passagem mínima é de 20 metros (10 metros para cada lado).

Para linhas de transmissão com tensões acima de 138 kV a faixa de servidão depende do tipo da torre a ser instalada. A faixa de servidão é norma particular de cada empresa possuidora de linhas de transmissão, sendo importante deixar claro que a análise proposta neste artigo faz a varredura transversal em 30 metros para ambos os lados da linha o que garante a inclusão de todos os valores em interesse.

Baseando-se nos conhecimentos científicos atuais, a Comissão Internacional para a Proteção contra as Radiações Não Ionizantes (ICNIRP, 1998) definiu um conjunto de limites básicos de exposição ao campo magnético para baixas frequências, tanto o público em geral quanto para a exposição ocupacional de trabalhadores.

Através da lei de Ampère, observa-se que ao mudar o arranjo das fases das linhas de transmissão, há variação no campo magnético total resultante produzido pelas correntes nos cabos fase.

Os estudos são realizados em linhas de transmissão reais e os mesmos podem ser aplicados a projetos futuros, que é o objetivo do artigo, pois, conhecendo-se o melhor arranjo de fases da linha é possível a construção da mesma com arranjo otimizado e assim reduzir a interferência magnética da mesma com estruturas e/ou seres vivos.

2 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS

As linhas de transmissão são compostas por duas partes, sendo a primeira a ativa, composta pelos condutores de energia elétrica, e a segunda a passiva, que são os isoladores, estruturas e ferragens. Esta tem o propósito de garantir o afastamento da parte ativa com o solo, a distância entre condutores, a sustentação da torre e suas demais composições físicas.

As linhas de transmissão possuem várias características e dimensões, tais como: número de circuitos, disposição de fases, tensão da linha, formato, dentre outros.

Neste artigo abordam-se as seguintes configurações de fase: horizontal, vertical e delta, todas com circuito duplo. São escolhidos, para fins de simulação, três sistemas de transmissão reais, que são detalhados através de suas características elétricas e geométricas a seguir:

- Linha de transmissão em geometria horizontal MLG-BNB, interliga as subestações de Milagres à Banabuiú no estado do Ceará, em operação desde 1988. Possui 225 km de extensão e pertence a CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco). Configurada com dois circuitos trifásicos de 230 kV. (CAMPOS, 2009)
- Linha de transmissão em geométrica vertical LT-Buritizeiro/Brasilândia, interliga as subestações de Buritizeiro à João pinheiro, no estado de Minas Gerais. Possui 132,1 km de extensão, e pertence a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). Configurada com dois circuitos trifásicos de 138 kV. (CEMIG, 1999)
- Linha de transmissão em geometria delta (triangular) LT-ILS, interliga a UHE-Ilha Solteira com a subestação de Inocência. Possui 81 km e pertence ao CESP (Companhia Energética de São Paulo). Configurada com dois circuitos trifásicos de 230 kV. (D.O.U., 2009)

2.1 Sistema - 1 – Milagres/Banabuiú

A seguir, na Figura 1, o sistema 1 em questão, ressaltando as distâncias reais dos cabos fase da linha de transmissão em relação ao solo.

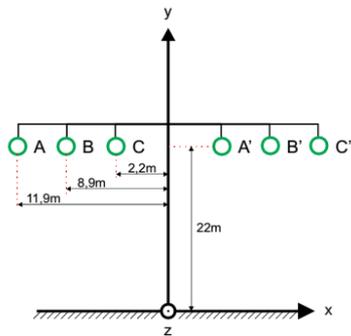


Figura 1. Linhas de transmissão com dois circuitos em forma horizontal.

2.2 Sistema - 2 – Buritizeiro/Brasilândia

Para o sistema 2 em análise, a Figura 2 com a representação do circuito duplo e suas alturas reais em relação ao solo.

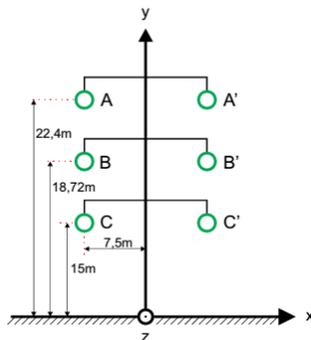


Figura 2. Linha de transmissão com dois circuitos em forma vertical.

2.3 Sistema - 3 - Ilha Solteira/Inocência

Para o sistema 3, vale destacar o circuito delta com as alturas e distâncias em simetria. Tal sistema é representado pela Figura 3 a seguir:

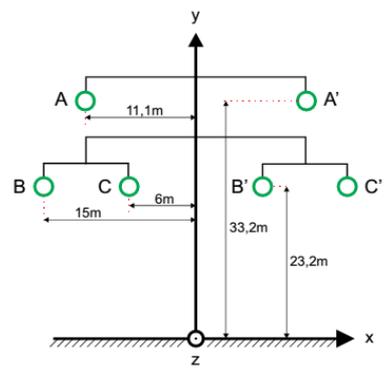


Figura 3. Linha de transmissão com dois circuitos em forma delta/triangular.

2.4 Método Utilizado

O método utilizado para a obtenção dos valores que são mostrados a seguir é baseado em pesquisas sobre linhas de transmissão reais, para que sejam apresentados resultados em conformidade com a realidade. Neste momento torna-se relevante explicar a opção pela não inclusão dos cabos para-raios na formulação final de campo magnético. Tal justificativa se baseia em trabalhos existentes na literatura os quais afirmam e comprovam que a presença dos cabos para-raios e suas correntes induzidas pouco influenciam no campo magnético final. A redução, segundo o trabalho de (MENDES, 2010 p.63), para o campo elétrico é da ordem de 2 a 3% e segundo (VIEIRA, 2013 p. 101 a p. 104) as reduções variam de 1% a 9%, dependendo da distância entre os cabos para-raios e os cabos fase. Vale ressaltar que tal redução é dada em função da Lei de Lenz, (SADIKU, 2004). Após coletados todos os dados necessários de cada modelo (horizontal, vertical, delta/triangular), é realizada a simulação, para as referidas situações, do campo magnético final resultante.

Os dados recolhidos depois de tais simulações são apresentados em gráficos e tabelas para uma melhor compreensão dos valores, não abordando conceitos matemáticos, mas apenas uma comparação dos melhores e piores resultados. A simulação de cada modelo segue a mesma sistemática.

São utilizados os seguintes valores de corrente, resistividade do solo, permeabilidade magnética e frequência respectivamente a seguir, em todas as simulações:

$$I_n = 2000 \text{ [A]}.$$

$$\rho_s = 100 \text{ [\Omega.m]}.$$

$$f = 60 \text{ [Hz]}.$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}.$$

Justificam-se os valores utilizados por se tratar de uma corrente comum em linhas de transmissão, em função da potência a ser transmitida. Vale ressaltar que a proposta do artigo é mostrar o melhor arranjo de fases de maneira que o campo magnético seja menor, assim para qualquer valor de corrente utilizado a redução percentual é a mesma. A resistividade, segundo os trabalhos de (VIEIRA, 2013 p.108) e (LÚCIO, 2012 p.65), para

valores acima de 50 [Ω .m], os resultados obtidos são os mesmos e por opção dos autores, utiliza-se o valor comum na literatura de 100 [Ω .m].

O ponto de análise que se toma de referência está a 1 m de altura, conforme a (IEEEStd 644-1994, 2008), que normatiza padrões de medição de campo magnético em linhas de transmissão. As distâncias do eixo de simetria são adotadas de maneira a realizar a varredura de toda a faixa da linha de transmissão, ou seja, em ± 30 [m].

3. MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA

3.1 Lei de Ampère

A formulação da Lei de Ampère estabelece, em sua forma integral, Equação (1), que a integral de linha do componente tangencial em torno de \vec{H} em torno de um caminho fechado é igual a corrente (I_{env}) envolvida pelo caminho. Tal corrente possui natureza puramente condutiva, daí a necessidade do conhecimento das correntes nos cabos fase da linha de transmissão. (SADIKU, 2004).

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_{env} \quad (1)$$

Tal equação é aplicada em um condutor filamental de comprimento infinito, o qual se aplica a linha de transmissão, em função da grande extensão da mesma se comparada a distância de medição, o que resulta na Equação (2).

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi\rho} \hat{a}_\phi \quad (2)$$

Onde I é a corrente que percorre a linha de transmissão e ρ é a distância da linha até o ponto de observação e \hat{a}_ϕ é o vetor unitário que indica a direção do campo magnético, podendo ser obtido através do produto vetorial a seguir:

$$\hat{a}_\phi = \hat{a}_L \times \hat{a}_\rho \quad (3)$$

Onde \hat{a}_L é o vetor unitário que define direção e sentido do fluxo ordenado de cargas elétricas (corrente elétrica) ao longo do condutor filamental e \hat{a}_ρ é o vetor unitário

que caracteriza a direção e o sentido do vetor cuja origem corresponde ao ponto do condutor filamentar determinado pela projeção ortogonal do ponto de observação do campo magnético (P) no condutor e a extremidade é o próprio ponto de observação. A Figura 4 mostra forma generalizada um sistema físico real monofásico onde é aplicada a Lei de Ampère para determinação do campo magnético \vec{H} no ponto P.

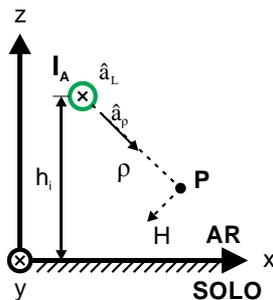


Figura 4. Sistema utilizado para o cálculo do campo magnético no presente artigo. Fonte: adaptado de (VIEIRA, 2013).

3.2 Método das Imagens

Segundo (SADIKU, 2004) 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.

A Figura 5 representa o sistema físico equivalente, resultado da aplicação do Método das Imagens no sistema monofásico mostrado na Figura 4.

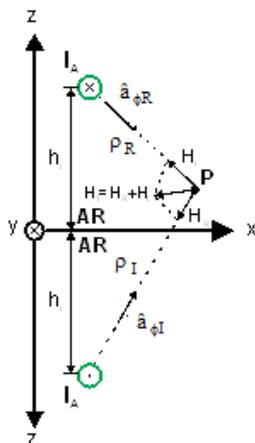


Figura 5. Método das imagens para um sistema monofásico. Fonte: adaptado de (VIEIRA, 2013).

Torna-se relevante destacar que o solo se torna um “plano de reflexão”, permitindo assim, o posicionamento da fonte de corrente imagem.

Assim, aplica-se a Lei de Ampère ao sistema físico equivalente, onde observação à superposição dos campos gerados pelas correntes reais e imagens. O campo total então é dado pela Equação (4), onde todas as grandezas envolvidas podem ser claramente visualizadas na Figura 5.

$$\vec{H}_T = \vec{H}_R + \vec{H}_I \quad (4)$$

$$\vec{H}_T = \frac{I}{2\pi\rho_R} \hat{a}_{\phi R} + \frac{I}{2\pi\rho_I} \hat{a}_{\phi I} \quad (5)$$

Por fim, aplica-se a Equação 5 a um sistema trifásico ilustrado na Figura 6, o que remete a Equação (6). Visualiza-se então que os campos magnéticos são constituídos por 6 grandezas (3 em função das correntes reais e 3 em função da correntes das).

$$\vec{H}_T = \sum_{i=1}^3 \frac{I_i}{2\pi\rho_{Ri}} \hat{a}_{\phi Ri} + \sum_{i=1}^3 \frac{I_i}{2\pi\rho_{Ii}} \hat{a}_{\phi Ii} \quad (6)$$

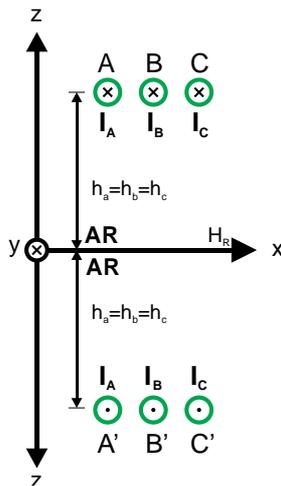


Figura 6. Método das Imagens para um sistema trifásico.

Fonte: adaptado de (VIEIRA, 2013).

3.3 Modelagem do efeito do solo

As correntes elétricas dos condutores de uma determinada linha de transmissão geram campos magnéticos cuja distribuição espacial, além de ser modificada pela presença do solo, penetra no mesmo. Tal efeito deve ser incluído na modelagem eletromagnética, uma vez que deve ser conhecida a profundidade de penetração do campo magnético no solo. Uma das maneiras de se modelar este efeito é mediante a utilização do Método das Imagens Complexas, desenvolvido por (DERI, 1981). Esse método consiste na concepção de um plano complexo de condutividade infinita de retorno de corrente, situado abaixo do solo, a uma distância igual à profundidade de penetração complexa “p”.

A Equação (7) é a formulação proposta por (DERI, 1981) para o cálculo da profundidade complexa p.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_s + j\omega\varepsilon_s)}} \quad (7)$$

Onde:

ω : Frequência angular, dada em $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$.

ε_s : Permissividade elétrica do solo, dada em $\left[\frac{\text{F}}{\text{m}}\right]$.

σ_s : Condutividade do solo, dada em $\left[\frac{\text{S}}{\text{m}}\right]$.

μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo, igual a $4\pi \times 10^{-7} \left[\frac{\text{H}}{\text{m}}\right]$.

Como a operação do sistema é dada em baixa frequência, (60 Hz), a densidade de corrente de deslocamento no solo é desconsiderada, simplificando-se, assim, a fórmula mencionada anteriormente.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_s}} = \sqrt{\frac{\rho_s}{j\omega\mu_0}} \quad (8)$$

Onde ρ_s é a resistividade do solo em questão, no caso deste trabalho utiliza-se o valor de 100 $[\Omega \cdot \text{m}]$.

De acordo com a Figura 7 a seguir, mostra-se através da aplicação do método complexo de (DERI, 1981), que o plano de reflexão corresponde ao plano complexo, neste caso.

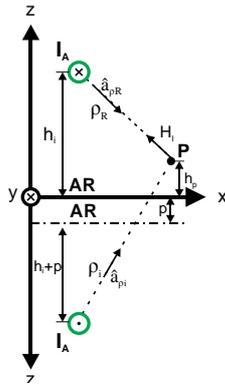


Figura 7. Método das Imagens Complexas de A. Deri.
Fonte: adaptado de (VIEIRA, 2013).

Segundo (LÚCIO, 2012) a metodologia de cálculo de (DERI, 1981) em baixas frequências resulta em valores muito próximos a de outros métodos mais complexos, dentre tais métodos mais complexos citam-se: Carlson, Nakagawa e Taku Noda. (GERTRUDES, 2010) e (LÚCIO, 2012).

Por este motivo opta-se por este método em função de sua simplificada implementação computacional.

Assim, a Equação (9), baseada no sistema monofásico da Figura 7 e aplicada a um sistema trifásico, calcula o campo magnético total produzido pelas correntes dos cabos fase de uma linha de transmissão.

$$\vec{H}_T = \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi(\rho_{Ri})^2} (h_p - h_i, 0, x_i - x_p) + \sum_{i=1}^3 \frac{|I_i| \angle \theta_i}{2\pi(\rho_{Ri})^2} (-h_p - h_i - 2p, 0, x_p - x_i) \quad (9)$$

Onde:

$|I_i|$ e Θ_i : correspondem, respectivamente, ao módulo e ângulo de fase das correntes em cada condutor dos sistemas sob análise;

h_p : é a altura (em relação ao solo) do ponto de análise (P) de campo magnético;

h_i : é a altura do i -ésimo condutor que transposta a i -ésima corrente;

x_i e x_p : são, respectivamente, as posições horizontais do i -ésimo condutor e do ponto de observação (tomadas em relação a alguma referência, onde $x = 0$, no caso, no centro da linha de transmissão);

ρ_R , ρ_l , ρ : já foram definidos anteriormente.

3.4 Corrente dos cabos

Em um sistema trifásico equilibrado as fases estão defasadas entre si da seguinte forma: -120° , 0° , $+120^\circ$. Existem duas configurações aceitas para a ordem das fases, sendo elas, ABC e CBA. No presente artigo utiliza-se nos cálculos o modelo ABC, conforme representado a seguir:

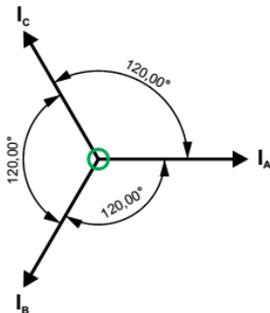


Figura 8. Fases A-B-C em um sistema trifásico, simétrico, balanceado.

3.5 Método aproximado para cálculo do campo magnético resultante.

A nomenclatura “Método Aproximado” deve-se ao fato de, ao calcular o campo magnético total (ou resultante) em um determinado ponto, no caso, tal método leva em consideração apenas os módulos finais dos componentes x e z de \vec{H} e \vec{B} .

A modelagem do solo pelo plano complexo de (DERI, 1981) resulta em valores adicionais de \vec{H} e \vec{B} de modo complexo (além dos associados aos fasores de corrente), possuindo, assim, uma parte real e uma parte imaginária para os componentes ao longo dos eixos x e z , representados nas Equações (10) e (11). Verifica-se que o campo se propaga nas direções x e z , por ter natureza rotacional, a Lei de Gauss de simetria cilíndrica é de simples visualização em relação aos eixos ordenados, por este motivo as próximas Equações, no caso de (10) a (14), são apresentadas em coordenadas retangulares.

$$\vec{H}_{TX} = \left[\vec{H}_{TRX} + j\vec{H}_{TIX} \right] \hat{a}_X = \vec{H}_X \angle \theta_X \hat{a}_X \quad (10)$$

$$\vec{H}_{TZ} = \left[\vec{H}_{TRZ} + j\vec{H}_{TIZ} \right] \hat{a}_Z = \vec{H}_Z \angle \theta_Z \hat{a}_Z \quad (11)$$

Aplicando-se o módulo, obtêm-se:

$$H_{TXMAX} = \sqrt{(H_{TRX})^2 + (H_{TIX})^2} \quad (12)$$

$$H_{TZMAX} = \sqrt{(H_{TRZ})^2 + (H_{TIZ})^2} \quad (13)$$

Obtendo-se os valores resultantes a partir da equação a seguir:

$$H_{TMAX} = \sqrt{(H_{TXMAX})^2 + (H_{TZMAX})^2} \quad (14)$$

$$B_{TMAX} = \mu_0 \vec{H}_{TMAX} \quad (15)$$

As Equações (14) e (15) são utilizadas para desenvolver a modelagem matemática do presente artigo.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

De acordo com os cálculos adotados e os valores estabelecidos, foi feita a modelagem matemática através de um programa computacional.

A escolha da metodologia foi baseada no método adotado por (VIEIRA, 2013), que comprovou a eficácia da modelagem diante um cenário semelhante ao presente artigo.

Apesar da carência de algumas informações por parte dos trabalhos pesquisados na literatura, existe uma ótima concordância entre os valores obtidos nesta dissertação com os valores medidos e calculados na literatura. Este fato comprova a consistência física da metodologia aplicada nos cálculos realizados nesta dissertação (VIEIRA, 2013).

O programa desenvolvido calcula o campo magnético de cada fase real, levando em consideração a resistividade do solo e o arranjo das fases, que é o objetivo do artigo apresentado.

Após simulações são obtidos vários gráficos trazendo as informações de campo magnético em relação às distâncias do eixo de simetria.

Para cada sistema obteve-se seis situações distintas de arranjos entre as fases, cada uma com valores de campos diferentes. Porém, para melhor visualização destacam-se os resultados do menor e maior valor de campo magnético para cada sistema. No caso, os Sistemas de linhas de transmissão citados anteriormente nos itens 2.1 a 2.3.

A subseção seguinte mostra os gráficos e tabelas oriundos das simulações realizadas para as linhas de transmissão reais, já citadas e apresentadas neste artigo.

4.1 Sistema - 1 - Configuração Horizontal

Nesta configuração observam-se valores de no máximo 10 [μ T]. Nota-se que o rearranjo de fases nessa linha de transmissão proporciona uma alta variação do campo magnético resultante. Tais valores podem ser visualizados na Tabela 1.

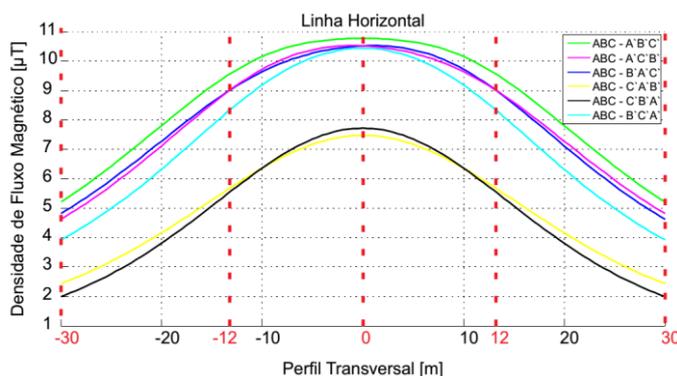


Figura 9. Gráfico do Sistema 1 com as seis simulações

Tabela 1. Destacados os dados do pior e melhor caso de campo magnético.

Campo Magnético (μ T)	Circuito Horizontal		
	ABC-A'B'C' (Pior Caso)	ABC-C'A'B' (Melhor Caso)	Varição %
0	10,78	7,478	44,16%
-12	9,814	5,946	65,05%
+12	9,814	5,946	65,05%
Limite: -30	5,215	2,438	113,90%
Limite: +30	5,215	2,438	113,90%

4.2 Sistema - 2 - Configuração Vertical

Através do gráfico da Figura 10 nota-se a pouca variação do campo magnético resultante final. Algumas mudanças no perfil do campo também são observadas, mas sem mudanças significativas no valor final. A Tabela 2 mostra tais valores.

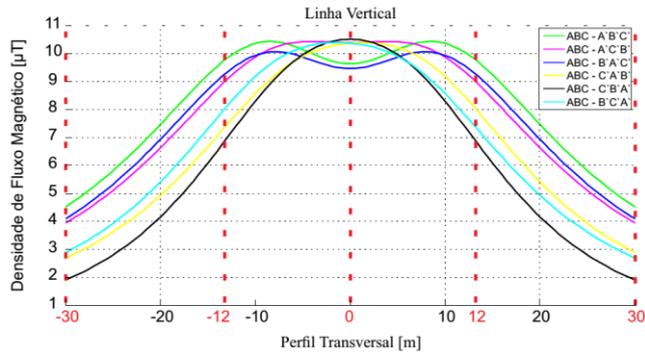


Figura 10. Gráfico do Sistema 2 com as seis simulações.

Tabela 2. Destacados os dados do pior e melhor caso de campo magnético.

Campo Magnético (μT)	Circuito Vertical		Variação %
	ABC-B'A'C' (Pior Caso)	ABC-C'B'A' (Melhor Caso)	
0	9,464	10,51	-9,95%
-12	9,576	7,42	29,06%
+12	9,576	7,42	29,06%
Limite: -30	4,088	1,908	114,26%
Limite: +30	4,088	1,908	114,26%

4.3 Sistema - 3 - Configuração Delta

Para esse tipo de linha de transmissão, ao se visualizar os gráficos, pode-se notar a maior variação nos valores do campo magnético resultante, conforme Figura 11 e Tabela 3.

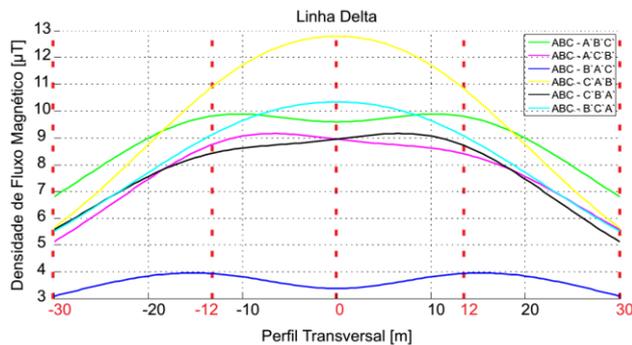


Figura 11. Gráfico do Sistema 3 com as seis simulações

Tabela 3. Destacados os dados do pior e melhor caso de campo magnético.

Campo Magnético (μT)	Circuito Delta		
	ABC-C'A'B' (Pior Caso)	ABC-A'C'B' (Melhor Caso)	Variação %
0	12,8	3,385	278,14%
-12	11,24	3,904	187,91%
+12	11,24	3,904	187,91%
Limite: -30	5,647	3,098	82,28%
Limite: +30	5,647	3,098	82,28%

5. CONCLUSÃO

Antes de concluir, vale frisar que a não utilização das correntes induzidas nos cabos para-raios pelas correntes dos cabos fase não foram considerados em função das mesmas apresentarem uma variação muito pequena no campo magnético final. Os trabalhos de (MENDES, 2010 p.63) e (VIEIRA, 2013 p.101) comprovam tal afirmação. Em suma, através da modelagem eletromagnética proposta por este artigo, aliada ao rearranjo de fases resulta em alterações significativas dos valores de campo magnético resultante no ponto em análise. Cita-se o caso do Sistema 3, onde houve uma variação de 278%, justificando assim a possibilidade um estudo prévio, caso haja interesse da concessionária, em uma futura implantação de uma linha de transmissão com arranjo de fases otimizado para um menor valor de campo magnético.

Projetar e implantar uma linha de transmissão envolve muitos outros critérios e análises, dentre eles citam-se o comprimento da linha de transmissão, topografia do terreno onde a mesma será instalada, quantidade de potência a ser transmitida, menor impacto ambiental, dentre outros. Assim, este artigo mostra que é possível a redução do valor do campo magnético resultado via rearranjo de fases.

ABSTRACT

This article is about a study to determine the best arrangement of phases in overhead transmission lines of double circuits through a consistent electromagnetic simulation modeling and subsequent appropriate program, so that it can determine the lowest net magnetic field value resultant at a certain height, in accordance with the valid rules. The results are presented as graphs and tables.

Keywords: ideal arrangement of phases. Transmission lines. Magnetic Field

VI. REFERÊNCIAS

CAMPOS, J. C. C. **Matrizes de Transformação Reais Aplicadas as Linhas de Transmissão de Circuito Duplo**. Tese de Doutorado. UNICAMP - 2009.

CEMIG. ER/LT - 908. "**Características de estruturas das Linhas de Transmissão tipo DL3 - 138 kV.**" – Belo Horizonte - 1999.

CPFL, **Orientação técnica. Linhas de Transmissão**- Ocupação de Faixa de Passagem, 2007.

D.O.U. DE 19/03/2009, **decreto N° 48500.003905/2008-92**, da Casa civil.

DERI A.; TEVAN G.; SEMLYEN A. e CASTANHERA A. – “The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return,”IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981.

GERTRUDES J. B., **Influência da condutividade e permissividade do solo em função da frequência no cálculo da impedância longitudinal e admitância transversal**. Tese de Doutorado. UNICAMP - 2010.

ICNIRP – **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection** (1998)

IEEE, 6441994. IEEE **Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines**, NY: IEEE, 1994 (R2008).

LÚCIO, S. M. M. – **Parâmetros longitudinais de linhas de transmissão**: Análise dos efeitos do solo e da frequência para a aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João del-Rei - 2012.

MENDES P. G. P., As linhas de alta tensão e a saúde pública. **Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Engenharia da Cidade do Porto - 2010.

SADIKU M. N. O. – **Elementos do Eletromagnetismo**, 3ª ed., Bookman, 2004.

SANTOS M. G. de – **Acoplamento elétrico entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. Dissertação de Mestrado.** Universidade Federal de São João del-Rei – 2011.

VIEIRA, H. R., **Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João del-Rei – 2013.