

Campos Elétrico e Magnético em Linhas de Transmissão de Energia

Resumo

Este artigo apresenta uma nova abordagem para o cálculo de campos elétricos e magnéticos de linhas aéreas de transmissão, ao utilizar "O método de simulação da carga ..." [1]. Neste caso, a análise do potencial elétrico no tempo, o cálculo das cargas instantâneas, e a utilização de correntes instantâneas, permitem obter os valores instantâneos dos campos. Os resultados obtidos pelo programa de computador para calcular os perfis do campo elétrico e do campo magnético ao nível do solo da linha aérea de transmissão Batalha - Pego 400 kV são comparados com as medições efetuadas nessa linha [2]. Podemos concluir que a simulação no tempo é mais precisa e dá valores consistentes com a realidade. O programa de cálculo desenvolvido pode ser utilizado com todas as possíveis configurações das linhas de transmissão. A aplicação do programa noutras linhas aéreas de transmissão permite a obtenção de conclusões interessantes sobre a questão da segurança e da saúde das pessoas. As simulações sugerem bons resultados sendo confirmados através das medições efetuadas noutras linhas de energia [2] [3].

Palavras-chave

Linha Aérea de Transmissão de Energia, Campo Elétrico, Campo Magnético, Método de Simulação da Carga, Valores Instantâneos, Limites de Exposição, Zona de Segurança.

1. Introdução

As Linhas Aéreas de Transmissão (LAT) criam campos elétricos e magnéticos cujos valores podem por em causa a segurança e a saúde do público geral ou população sujeita a exposições frequentes ou permanentes.

A determinação dos valores previsíveis dos campos a alturas próximas do solo ($\approx 1\text{m}$) na faixa de segurança e até alguns metros para lá é fundamental para definir restrições e níveis de exposição da população a campos eletromagnéticos.

A metodologia utilizada neste trabalho para cálculo do campo elétrico em LAT baseia-se no Método de Simulação de Cargas [1]. Com a particularidade de os campos serem calculados no tempo, devido à atual capacidade de cálculo dos programas computacionais, obtêm-se valores teóricos mais consentâneos com a realidade.

As medições utilizadas [2] e [4] para comparação com os valores calculados fazem parte do estudo da LAT Batalha – Pego, 400 kV (perfil 10) e da LAT RM/PR – Batalha2 (perfil 3).

2. Campo Elétrico

O Método de Simulação de Cargas [1] consiste na substituição da distribuição real de cargas elétricas na superfície do condutor, a um determinado potencial, por n linhas de cargas fictícias colocadas no interior do condutor.

A simplicidade geométrica dos condutores de uma LAT permite considerar uma única linha de carga, cuja dimensão equivalente é dada pelo raio médio geométrico do condutor ou da fase se constituída por vários condutores, o que simplifica os cálculos.

O cálculo dos campos elétricos efetua-se a partir do conhecimento das cargas elétricas em cada uma das fases da linha e nos cabos de guarda.

O solo é assumido como um condutor perfeito, o tempo para que as cargas se redistribuam na sua superfície é extremamente pequeno ($0,1$ a 100ns) e é menor que o tempo de relaxação ($\tau = \rho \epsilon$), comparado com a frequência do sistema de energia.

Os valores das cargas instantâneas, matriz [q], são obtidos a partir do potencial instantâneo nos condutores, matriz [v], e pelo coeficiente do potencial de Maxwell, matriz [P], na solução da equação:

$$[q] = [P]^{-1} [v] \quad (1)$$

É utilizado o modelo bidimensional para o cálculo do perfil de variação do campo, no plano vertical perpendicular à direção da LAT. Este modelo, relativamente simples, é de rigor adequado.

Para LAT cujos condutores são paralelos (i, j, ...) sobre um solo perfeitamente plano, os elementos da matriz [P] são dados pelas equações;

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_i}{r_i^*}\right) \quad (2)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left[\frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Onde; y_i é a distância do condutor ao solo, x_i e a posição horizontal do condutor em relação ao eixo da LAT e r_i^* o raio médio geométrico do condutor, para os condutores (i, j, ...).

Para as fases com feixe de condutores o raio médio geométrico é dado por [5],

$$r_i^* = \sqrt[m]{m r_{mg} R^{m-1}} \quad (4)$$

$$R = \frac{d}{2 \operatorname{sen}(\pi/m)} \quad (5)$$

Onde; m é o número de condutores do feixe, r_{mg} é o raio médio geométrico de cada condutor e d a distância entre condutores adjacentes.

Resolvida a equação (1) e determinada a carga nas fases e cabos de guarda, pode-se calcular o campo elétrico instantâneo devido a cada condutor no ponto N de coordenadas (x_N , y_N) no espaço, onde o campo elétrico devido a carga no condutor i, e à sua imagem no solo é:

$$\vec{E}_i = E_{x,i} \vec{u}_x + E_{y,i} \vec{u}_y \quad (6)$$

\vec{u}_x e \vec{u}_y são os vetores unitários horizontal e vertical e as componentes respectivas de (7) (8) são dados por;

$$E_{x,i} = \frac{q_i (x_N - x_i)}{2\pi\epsilon_0 [(x_N - x_i)^2 + (y_N - y_i)^2]} - \frac{q_i (x_N - x_i)}{2\pi\epsilon_0 [(x_N - x_i)^2 + (y_N + y_i)^2]} \quad (7)$$

$$E_{y,i} = \frac{q_i (y_N - y_i)}{2\pi\epsilon_0 [(x_N - x_i)^2 + (y_N - y_i)^2]} - \frac{q_i (y_N + y_i)}{2\pi\epsilon_0 [(x_N - x_i)^2 + (y_N + y_i)^2]} \quad (8)$$

As componentes horizontal (9) e vertical (10) do campo elétrico, são calculadas pelo somatório das contribuições de todos os condutores (i, j, ...).

Sendo que cada uma dessas componentes é um vetor alternado sinusoidal,

$$E_{x,N} = \sum_i E_{x,i} \quad (9)$$

$$E_{y,N} = \sum_i E_{y,i} \quad (10)$$

o módulo instantâneo do campo é definido por:

$$E_N = \sqrt{E_{x,N}^2 + E_{y,N}^2} \quad (11)$$

O campo é girante, descrevendo uma trajetória pulsante elíptica no plano transversal (xy).

É possível calcular os valores máximos instantâneos, tanto do vetor campo, como das suas componentes no plano, assim como os respetivos valores eficazes.

3. Campo Magnético

O cálculo do perfil do campo magnético também é efetuado para o plano vertical e perpendicular à linha, as correntes instantâneas têm a direção do eixo z. O campo magnético instantâneo no ponto N é dado pela sobreposição vetorial dos campos criados pelas correntes nos condutores de fase (12).

$$\vec{B}_N = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i \frac{\vec{i}_i \times \vec{r}_{iN}}{r_{iN}^2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i \frac{i_i}{r_{iN}} \vec{\phi}_{iN} \quad (12)$$

\vec{r}_{iN} é o vetor de posição do ponto N em relação à corrente i, cujo módulo é

$$r_{iN} = \sqrt{(x_N - x_i)^2 + (y_N - y_i)^2} \quad (13)$$

e $\vec{\phi}_{iN}$ é o vetor unitário do produto externo do vetor corrente com o vetor de posição

$$\vec{\phi}_{iN} = -\frac{y_N - y_i}{r_{iN}} \vec{u}_x + \frac{x_N - x_i}{r_{iN}} \vec{u}_y \quad (14)$$

As correntes de retorno pela terra são desprezadas, tal com as correntes nos cabos de guarda que são nulas em situação de equilíbrio estacionário, como o solo é considerado um condutor perfeito a corrente de retorno de sistemas elétricos trifásicos simétricos é nula.

4. Linha Aérea de Transmissão Batalha-Pêgo

Para a LAT em estudo, 400 kV (50 Hz) de configuração horizontal, foram calculados os perfis do campo elétrico e do campo magnético, no plano vertical transversal à linha, tomando como parâmetros as características de projeto no local em que foram executadas as medições, e obtidas as alturas cabo - solo do perfil 10 do RL 0718/07 – AT [2].

O gráfico da Fig.1 mostra os valores máximos calculados para as componentes do campo elétrico, à altura de 1,8 metros.

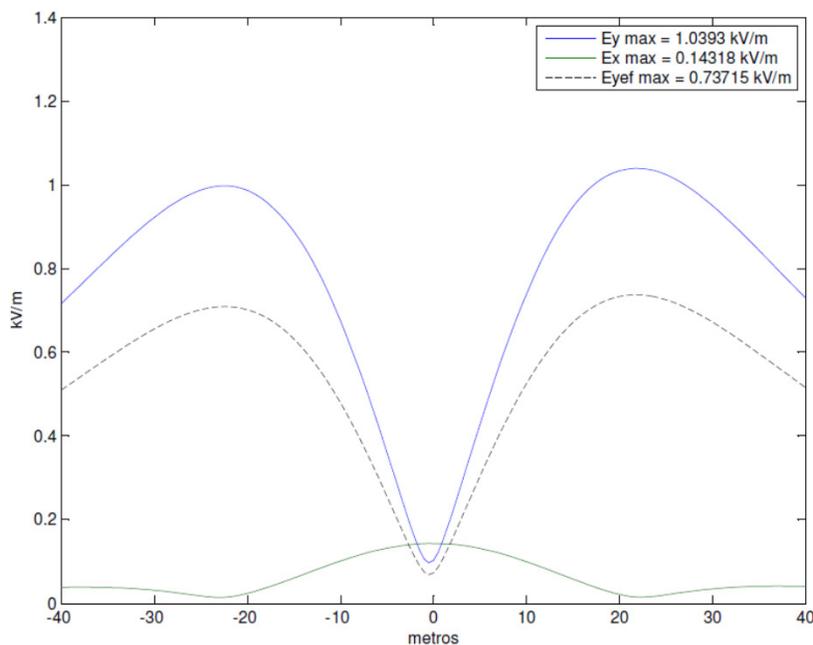


Figura 1 - Perfil do campo elétrico para valores calculados – componentes vertical e horizontal

O valor máximo do campo verifica-se no ponto 22 m, $E_{\max}=1,04$ kV/m sendo o valor eficaz máximo $E_{\text{ef } \max}=0,74$ kV/m.

Para as medições dos campos foram utilizados instrumentos apropriados para medições de LAT e de acordo com as Normas CEI de ensaio e medição [2].

As medições foram executadas no eixo perpendicular ao sentido longitudinal da LAT, no vão entre as torres 66 e 67 (perfil 10) e em pontos espaçados de 2 m.

O equipamento de medida indica os valores máximos dos campos, em valor eficaz (RMS) [2].

O gráfico da Fig.2 mostra os valores medidos e os valores calculados para o campo elétrico.

As condições de medição dos campos não foram as excelentes.

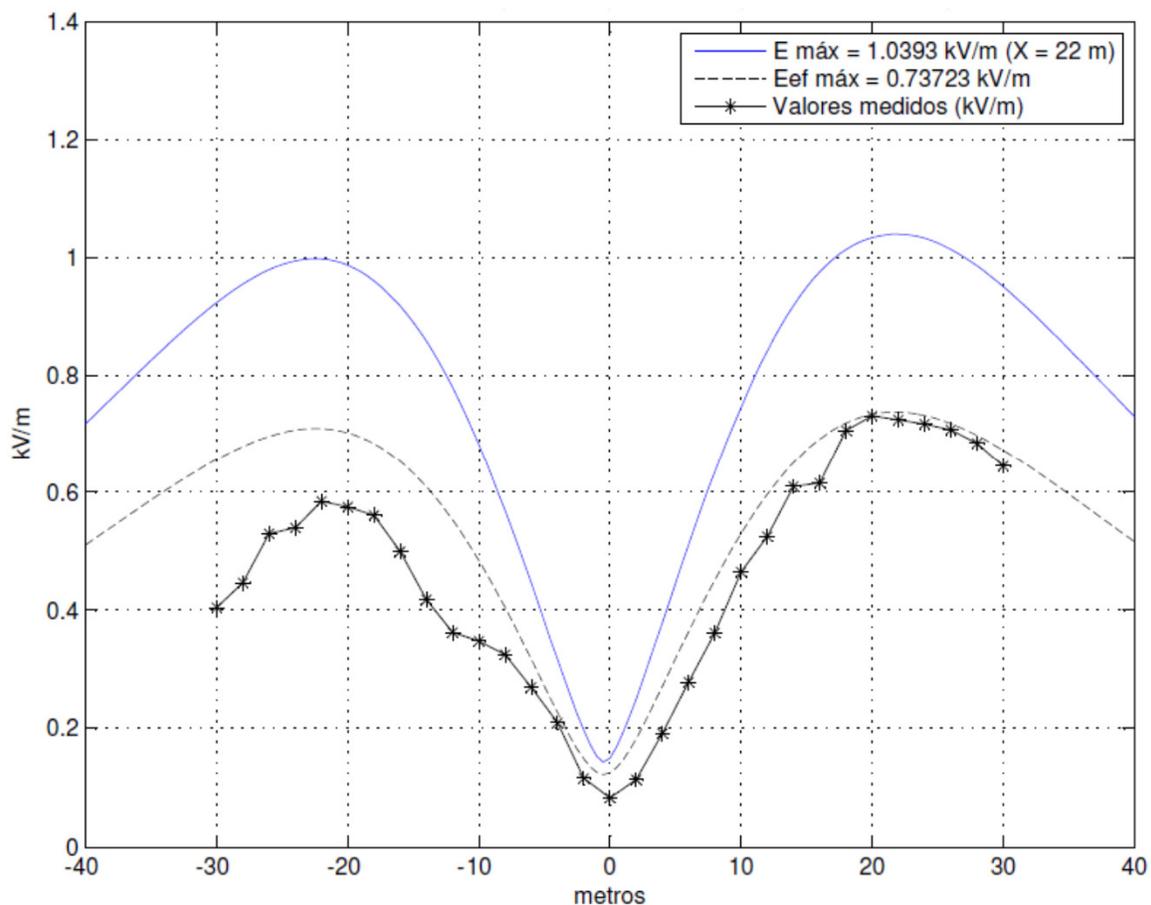


Figura 2 - Perfil do campo elétrico para os valores medidos e calculados

Na análise dos valores calculados e medidos do perfil do campo elétrico verifica-se que as maiores discrepâncias encontradas (Fig.3) são devido à existência de um declive de cerca de 2 m entre a LAT e o ponto -40 e a um muro que acompanha o perfil e funciona como ecrã do campo [2]. Na generalidade as discrepâncias podem ser explicadas por se ter considerado um solo de condução perfeita, plano e horizontal e de extensão infinita.

Se for considerado que as discrepâncias são devidas às condições em que foram efetuadas as medições, os valores podem ser considerados excelentes.

Na Fig.4 apresenta-se a trajetória descrita pelo vetor campo elétrico, no ponto $x_N = 0$ m ($y_N = 1,8$ m).

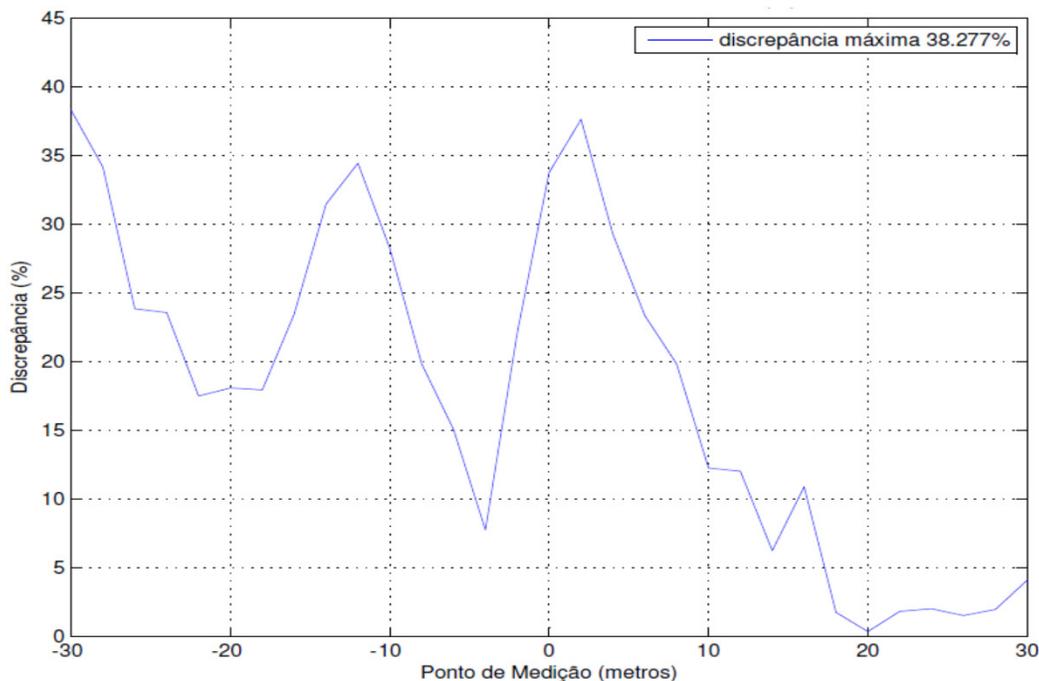


Figura 3 - Discrepância entre valores Calculados e Medidos

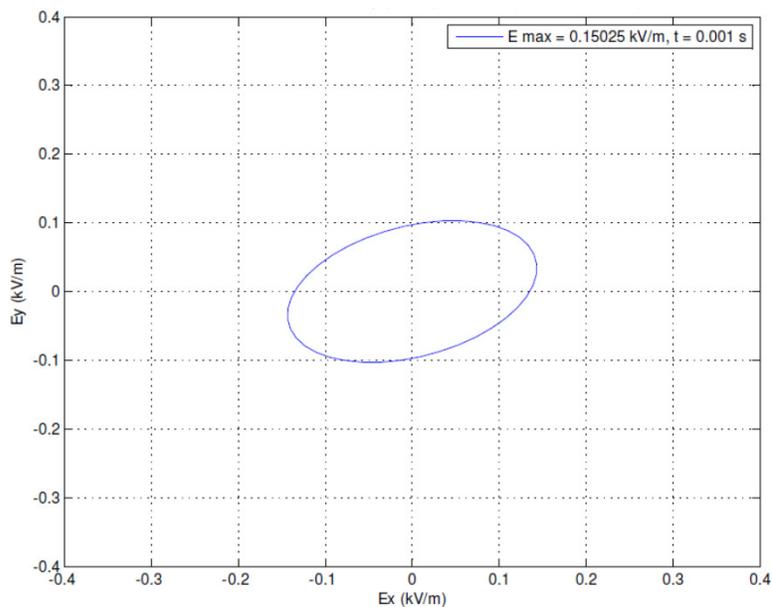


Figura 4 - Trajetória do vetor campo elétrico – $x_N = 0$ ($y_N = 1,8$ m)

Simulou-se a distância mínima do cabo – solo, igual a 12 m, que originava um perfil do campo elétrico com um valor eficaz máximo inferior a 5 kV/m na zona de segurança, para a altura de 1,8 m.

O perfil do campo magnético e das respectivas componentes no plano (Fig.5) foi calculado para a corrente de 290 A, que se estabeleceu durante a medição do campo magnético desta LAT.

O gráfico da Fig.6 mostra os valores medidos e os valores calculados para o campo magnético, considerando que a corrente atingiu o valor máximo de 290 A.

A carga máxima da LAT Batalha – Pego é de 2500 A, para este perfil o valor calculado para o $B_{ef\ max}$ seria de 7,8 μT .

Para a distância mínima do cabo - solo de 12 m e para a carga máxima obtém-se $B_{ef\ max} = 49,5\ \mu T$.

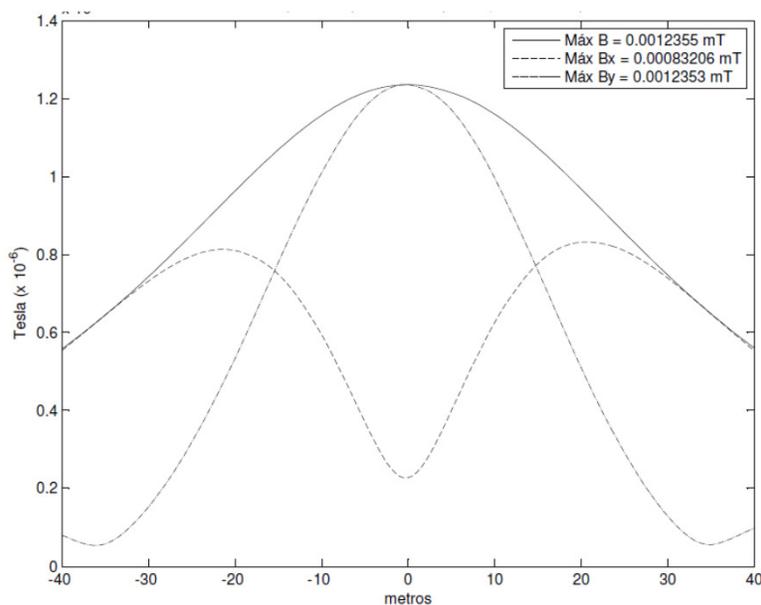


Figura 5 - Perfil do campo magnético máximo e das componentes horizontal e vertical

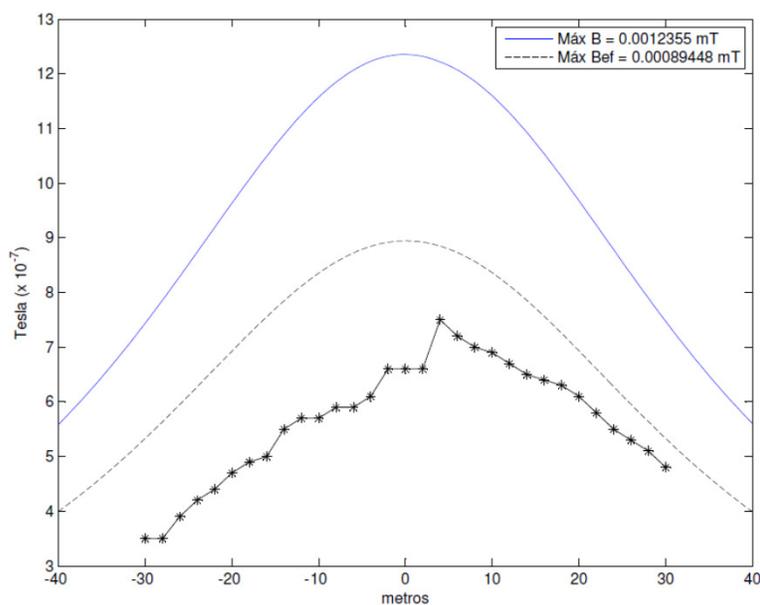


Figura 6 - Perfil do campo magnético para os valores medidos e calculados

Na Fig.7 apresenta-se a trajetória descrita pelo vetor campo magnético, no ponto $x_N = 20$ m ($y_N = 1,8$ m).

O programa de cálculo foi também aplicado, com sucesso e com resultados excelentes, a outros perfis com medições que apresentavam confiança e fiabilidade, perfil 8 [2] e perfis 17 e 18 do RL 696/04 – AT [3].

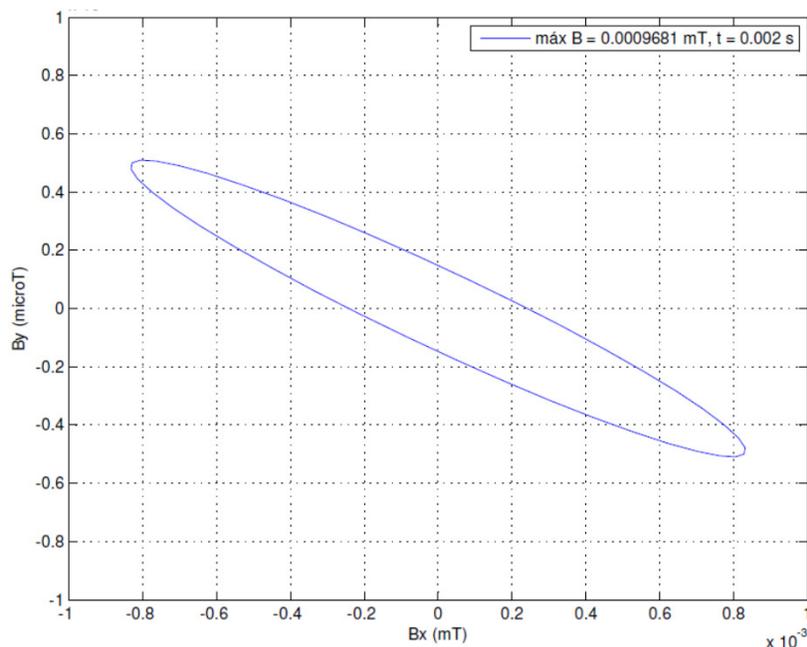


Figura 7 - Trajetória de campo magnético no ponto 20 m, altura 1,8 m

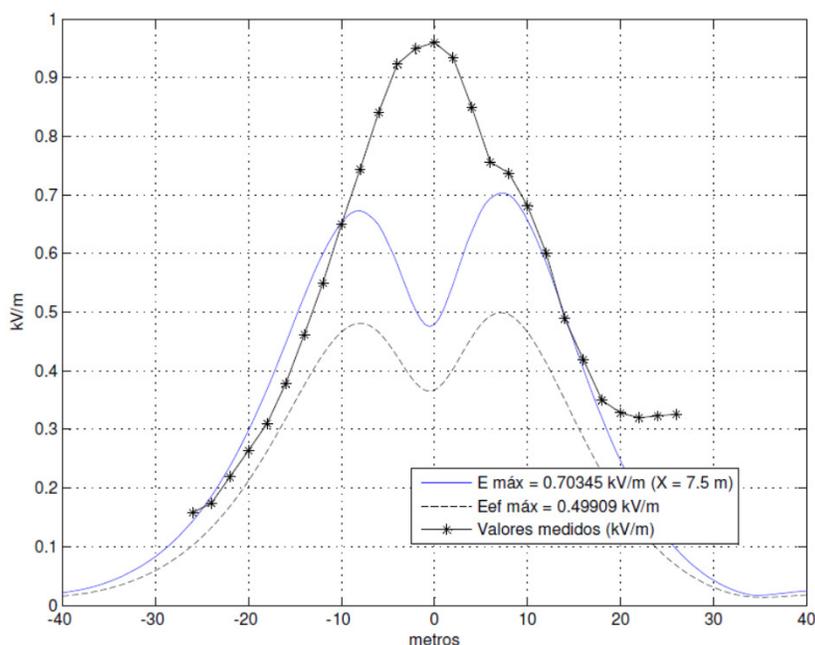


Figura 8 - Perfil do campo elétrico para os valores medidos e calculados – LAT RM/PR – Batalha2 em fase

5. Linha Aérea de Transmissão Dupla RM/PR - BATALHA

Um interessante caso de estudo, que confirmou as potencialidades do cálculo no tempo dos campos.

A LAT dupla RM/PR – Batalha [4] de 220 kV é suportada por postes tipo DL de 8 m de largura. É uma LAT com dois ternos de configuração vertical, as fases mais próximas do solo

ficam à altura aproximada de 17 m. A LAT dupla é um troço comum de duas linhas de origens diferentes, LAT Rio Maior – Batalha2 e LAT Pereiros/Recarei – Batalha2. As correntes máximas são, respetivamente, 1000 A e 622 A.

Foi simulada a colocação de baixo para cima das fases a, b, c - c', b', a' das linhas, e considerou-se as duas linhas em fase. A Fig.8 mostra os cálculos obtidos e as medições respectivas efetuadas para o perfil 3 do campo elétrico do relatório 0969/06 – AT [4], sendo o resultado inconsistente.

É evidente que as linhas aéreas de transmissão, de proveniências diferentes, não estavam em fase quando foram efetuadas as medições.

Tendo sido simulado um desfaseamento de cerca de 60° entre elas, os resultados obtidos para os perfis dos campos, à altura de 1,8 m, justificam esta situação (Fig.9 e Fig.11).

Na análise dos valores calculados e medidos do perfil do campo elétrico verificam-se as discrepâncias apresentadas na Fig.10, para além dos 20 m da linha (Fig.9) o ligeiro aumento dos campos medidos é devido, provavelmente, à existência de duas linhas de 400 kV a cerca de 70 m para o lado esquerdo e de uma linha de 220 kV a cerca de 50 m do lado direito [4].

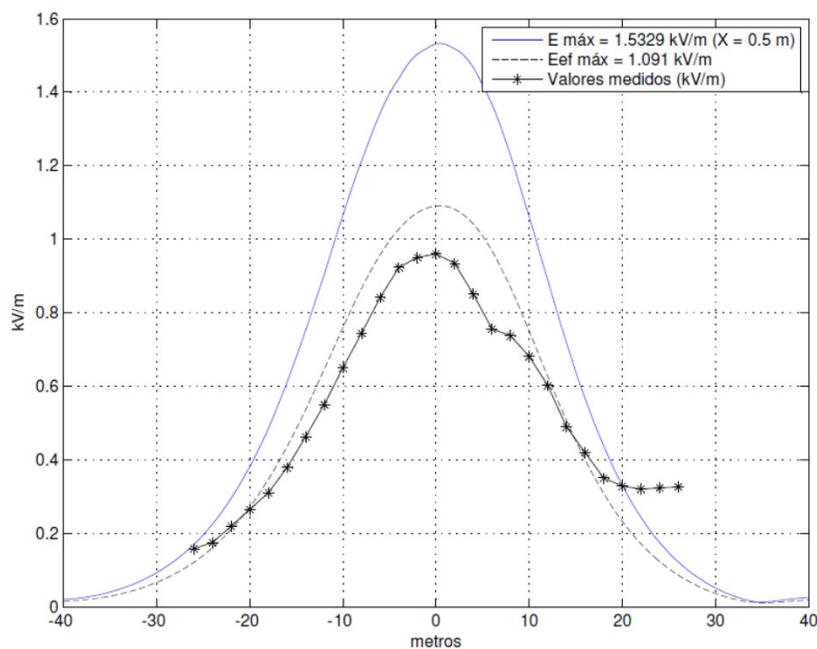


Figura 9 - Perfil do campo elétrico para os valores medidos e calculados – LAT RM/PR – Batalha2 desfasadas

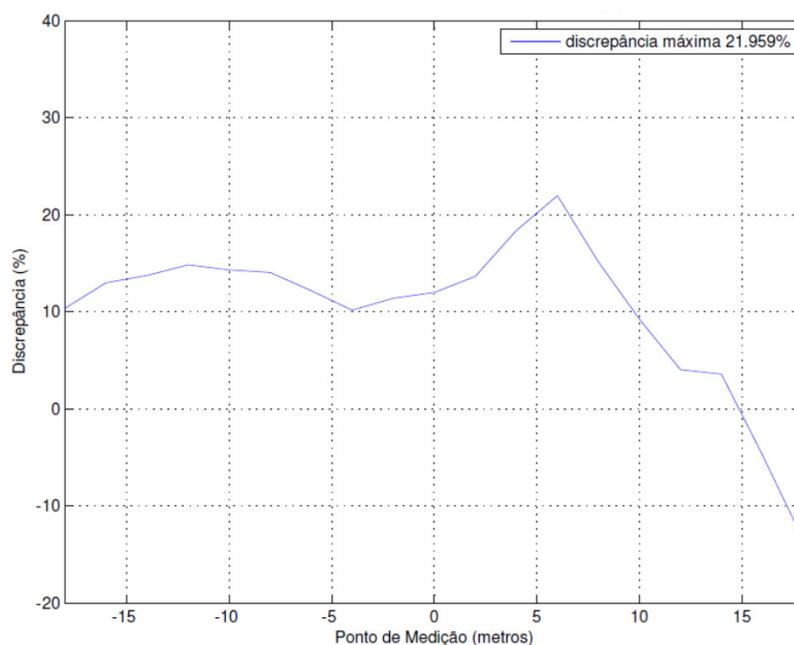


Figura 10 - Discrepância entre valores Calculados e Medidos - linhas RM/PR – Batalha2 desfasadas

O perfil do campo magnético (Fig.11) foi calculado para as correntes de 140 A e 55 A que se estabeleceram durante a medição do campo magnético desta LAT dupla.

Simulou-se a distância mínima do cabo – solo, na condição extrema das LAT estarem desfasadas de 120° e os condutores mais próximos do solo estarem em fase, que originava um perfil do campo elétrico com um valor eficaz máximo inferior a 5 kV/m na zona de segurança e para a altura de 1,8 m. A distância mínima cabo – solo obtida foi de 7 metros.

Para esta distância mínima e para as correntes máximas previstas para as linhas, 1000 A e 622 A, obteve-se o valor eficaz máximo de $25,5 \mu\text{T}$ para o campo magnético.

6. Linhas Aéreas de 1100 kV

O programa foi aplicado para o cálculo dos campos de duas Linhas de Ultra Alta Tensão.

Procurou-se obter a distância mínima do cabo - solo que originava um perfil do campo elétrico com um valor eficaz máximo inferior a 5 kV/m na zona de segurança, ao nível do solo.

Os cálculos dos campos são efetuados para a altura de 1 m.

A. Linha Aérea de Transmissão Kita - Iwaki

A linha aérea de transmissão *Kita – Iwaki* [6] de 1100 kV é suportada por postes de 108 m de altura e 38 m de largura.

É uma linha dupla com dois ternos de configuração vertical sendo as fases constituídas por feixes de oito condutores, as fases mais próximas do solo ficam à altura de 50 m.

A corrente pode atingir 8000 A, durante períodos de tempo relativamente curtos.

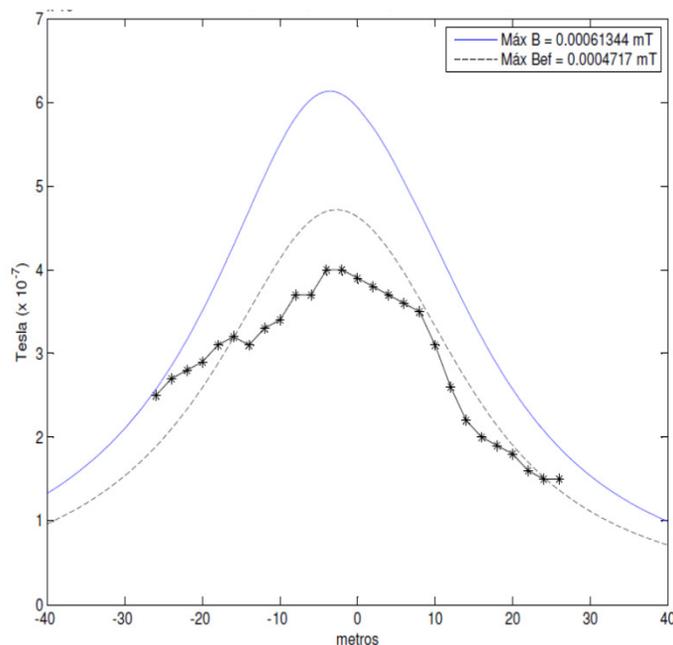


Figura 11 - Perfil do campo magnético para os valores medidos e calculados – LAT RM/PR – Batalha2 desfasadas

A distância mínima cabo - solo é de 31 m para que o valor eficaz do campo elétrico não ultrapasse os 5 kV/m (Fig.12).

O perfil do campo magnético foi calculado para correntes de 8000 A e para a mesma distância cabo – solo (Fig.13).

O valor eficaz da componente vertical do campo é praticamente igual ao valor eficaz do vetor campo.

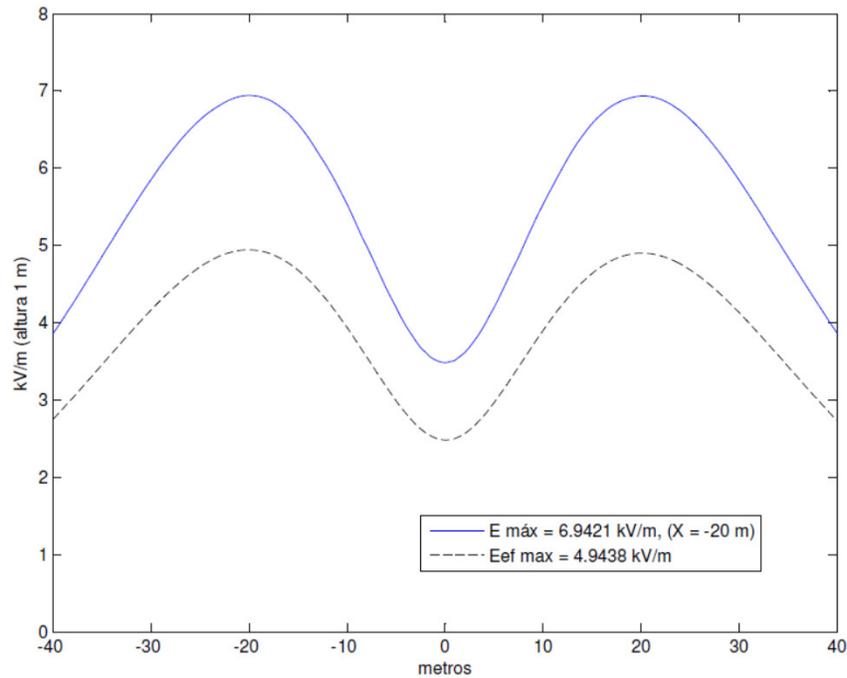


Figura 12 - Perfil do campo elétrico – Distância do cabo - solo de 31 m

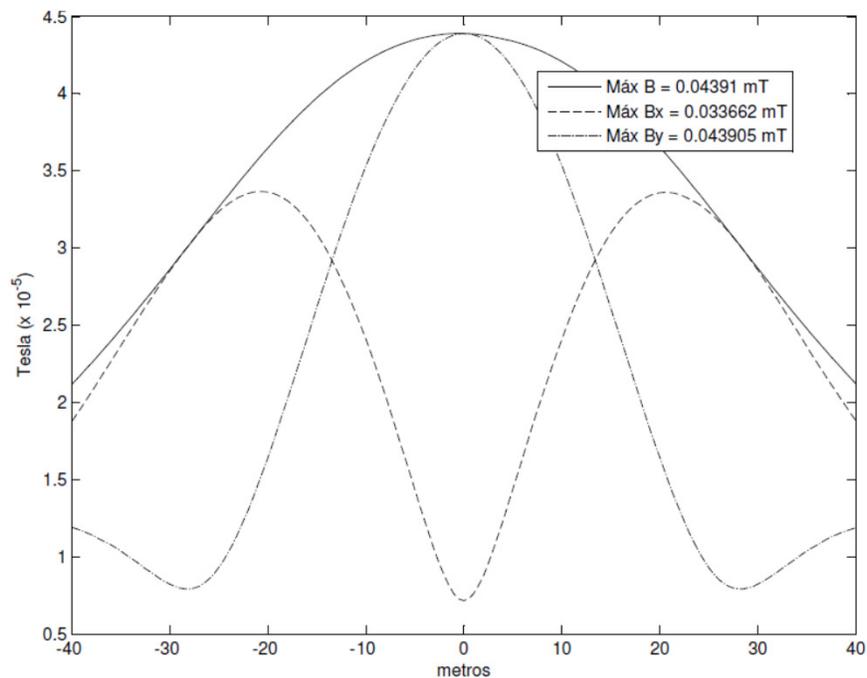


Figura 13 - Perfil do campo magnético máximo e das componentes horizontal e vertical – Distância do cabo - solo de 31 m

Foi simulada a situação de um dos ternos verticais se encontrar desligado. Como o equilíbrio da simetria das fases desaparece, o campo elétrico intensifica-se (Fig.14). Situação idêntica à que ocorre quando se aumenta a distância entre os condutores (fases).

A distância mínima do cabo – solo, nestas condições, teria de aumentar para 35 m, para que na zona de segurança o valor eficaz do campo elétrico não ultrapassasse o valor de referência. O cálculo do perfil do campo magnético, naquela situação, está representado na Fig.15.

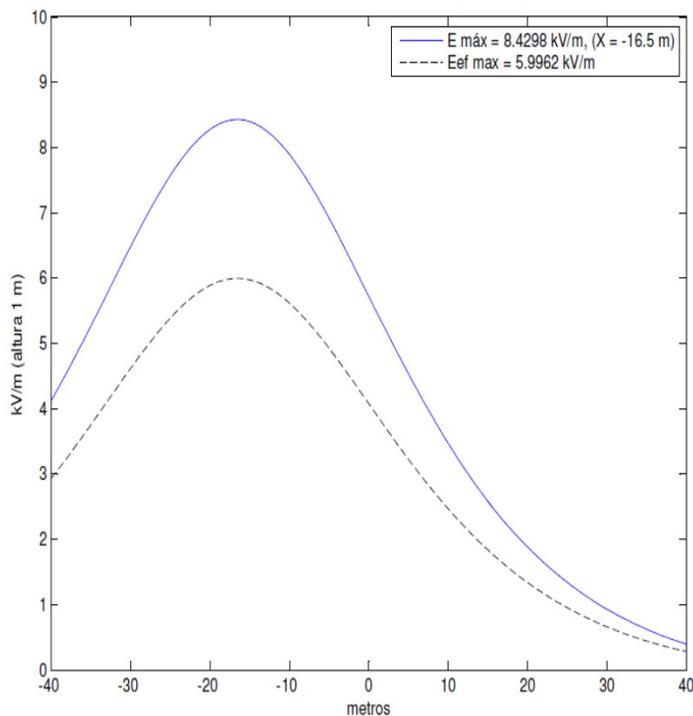


Figura 14 - Perfil do campo elétrico (1 terno vertical)

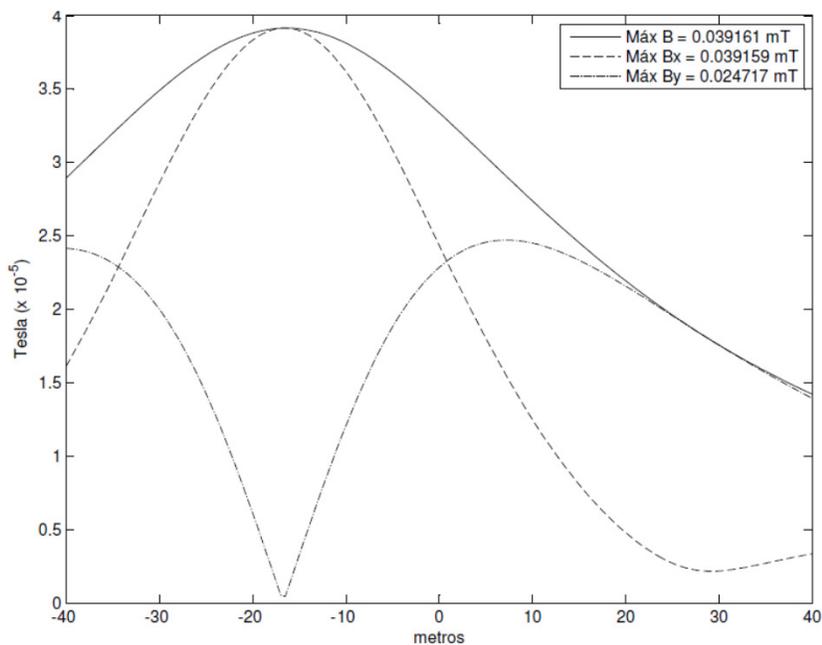


Figura 15 - Perfil do campo magnético máximo (1 terno vertical) e das componentes horizontal e vertical

B. Linha Aérea de Transmissão Ekibastuz - Kokchetav

A LAT Ekibastuz – Kokchetav [6] de 1100 kV é suportada por postes de 44 m de altura e 48 m de largura. É constituída por um terno de configuração horizontal sendo as fases constituídas por feixes de oito condutores, as fases exteriores, que se encontram mais próximas do solo, ficam à altura de 32 m. A corrente pode atingir 8000 A.

Não existe distância mínima cabo - solo para que o valor eficaz do campo elétrico não ultrapasse os 5 kV/m.

Para a distância teórica de 32 metros o valor eficaz máximo calculado é igual a 5,4 kV/m (Fig.16).

Para que o valor eficaz do campo fosse inferior a 5 kV/m, na zona de segurança, a distância mínima do cabo – solo teria de ser de 34 m.

O perfil do campo magnético calculado para os pontos com 1 m de altura, supondo que os condutores se encontram à distância de 32 m do solo e a corrente é de 8000 A, está representado na Fig.17.

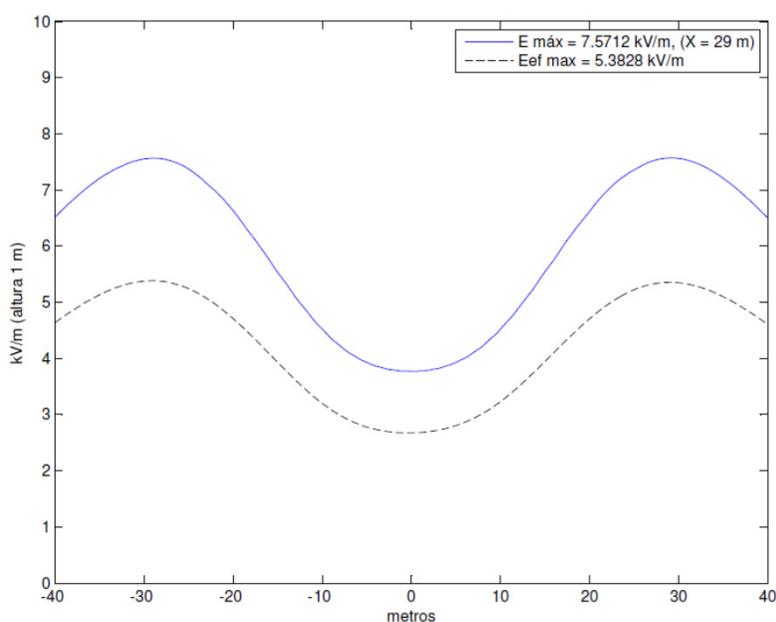


Figura 16 - Perfil do campo elétrico – Distância do cabo - solo de 32 m

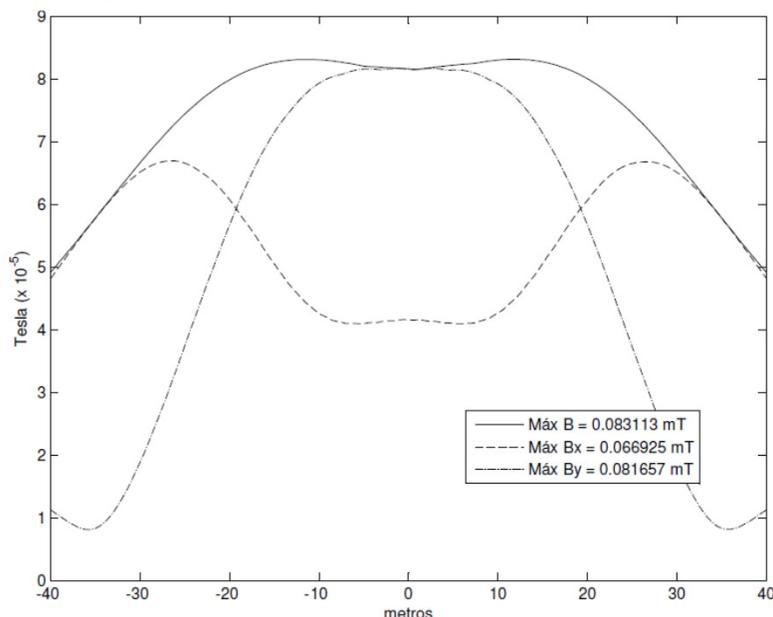


Figura 17 - Perfil do campo magnético máximo e das componentes horizontal e vertical – Distância do cabo - solo de 32 m

Em termos gerais, pode-se concluir que o campo elétrico máximo no solo é menor para a configuração triangular equilateral das LAT e maior para as configurações vertical e horizontal. O campo elétrico fora da faixa de segurança é mais pequeno para a configuração vertical e é maior para a configuração horizontal.

É inconsequente tentar parametrizar o campo elétrico em função das dimensões geométricas das LAT, mesmo que não se considere a condutividade do terreno, basta a diversidade da tipologia dos apoios e o número de condutores que constituem as fases, para inviabilizar essa intenção. É apenas possível prever uma distância mínima que cumpra as condições de segurança estudadas.

O efeito da dimensão do condutor pode ser avaliado, no caso de feixes nas fases, usando o raio equivalente [5].

O condutor equivalente tem a mesma carga elétrica total por unidade de comprimento da fase, o que causa o mesmo campo no solo.

Verifica-se que a duplicação teórica do raio equivalente provoca um aumento de cerca de 15% no valor do campo elétrico.

Os cabos de guarda (CG) praticamente não influenciam o campo elétrico ao nível do solo.

A não existência teórica dos CG aumentava o campo elétrico no solo no máximo de 4%, para a configuração horizontal de 1100 kV.

7. Conclusão

A utilização de valores eficazes nos potenciais e nas cargas, na simulação dos campos elétricos, utilizando o método da simulação das cargas e apresentado na maioria das publicações sobre o assunto, mostra-se adequado. Apesar da utilização de campos estacionários originar a obtenção de valores eficazes aproximados para os campos elétricos.

A utilização de valores instantâneos no método da simulação das cargas apresenta resultados teóricos, em condições ideais, próximos ou coincidentes com os valores reais e medidos.

O método utilizado para o cálculo mostrou-se eficaz e preciso na determinação do perfil do campo elétrico ao nível do solo em LAT, os resultados são obtidos de forma rápida e com relativa simplicidade, os valores obtidos estão otimizados devido às condições ideais consideradas, solo plano, horizontal, infinito e condutor perfeito e condutores teoricamente paralelos entre si e ao solo (o efeito de flecha desprezado quando considerado o ponto mais baixo da catenária), o que poderá ser corrigido com um conhecimento mais detalhado das condições de implementação da LAT.

O campo magnético em pontos igualmente afastados de um sistema trifásico simétrico de correntes é nulo devido à sua natureza rotacional.

Em pontos suficientemente afastados do sistema trifásico, devido à assimetria da colocação das fases, o valor do campo é residual.

A utilização dos valores eficazes das correntes na simulação computacional do campo magnético não é a mais adequada, obtendo valores excessivamente divergentes.

A utilização de valores instantâneos permite obter valores coincidentes com os valores teóricos previstos.

Os campos elétricos e magnéticos máximos, recomendados para Público Permanente, são respetivamente; 5 kV/m (RMS) e 0,100 mT (RMS) [6].

De acordo com estes valores, a grande maioria das LAT, com tensões nominais inferiores a 800 kV, não necessitam de zona de segurança para o campo elétrico, desde que cumpram uma distância mínima ao solo (público).

A distância mínima ao solo para uma linha típica de 800 kV, com configuração horizontal, considerando uma distância entre fases de 16 m e as fases constituídas por 4 condutores, é de 23 m.

Os campos magnéticos das linhas aéreas de transmissão têm valores reduzidos e inferiores ao limite considerado como perigoso para a saúde pública.

O campo magnético das linhas aéreas de transmissão não tem influência na segurança do público permanente, de acordo com as recomendações.

Estudos futuros poderão reavaliar os procedimentos de medição e de cálculo com a finalidade de minimizar as discrepâncias encontradas, e a implementação de novos conceitos ao programa tornando-o mais abrangente neste tipo de cálculo.

Referências

- [1] H. Singer, H. Steinbigler, e P. Weiss, "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields," IEEE Trans., vol. PAS-93, pp. 1660-1668, January 1974.
- [2] REN - Portugal, Informação Técnica, Monitorização – Campos Eléctrico e Magnético, Relatório da Linha Batalha – Pego, Novembro 2007.
- [3] REN - Portugal, Informação Técnica, Monitorização – Campos Eléctrico e Magnético, Relatório da Linha Fanhões – Alto Mira IV/V a 400 kV, Novembro 2004.
- [4] REN - Portugal, Informação Técnica, Monitorização – Campos Eléctrico e Magnético, Relatório do Troço comum às Linhas Batalha – Recarei e Batalha – Rio Maior 3, Novembro 2006.
- [5] J. S. Paiva, "Redes de Energia Eléctrica – uma análise sistémica", ISTPress, Lisboa, Abril 2005.
- [6] Siemens Energy Sector, UHV AC Entwicklung uber 1100 kV, L.-R. Janicke, at all, Hannover Messe, April 2008.
- [7] Council Recommendation on the Limitation of Exposure of the General Public to Electromagnetic Fields 0 Hz – 300 GHz, 2188ª Reunião do Conselho da União Europeia, Junho 1999.

Agradecimentos

Agradeço a REN – Rede Eléctrica Nacional toda a disponibilidade no acesso às publicações da Informação Técnica, e na colaboração do Centro de Informação Técnica da REN para a utilização dos dados técnicos e medições.

<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/Paginas/MonitorizacaoCamposElectricoMagnetico.aspx>

Obs:

Artigo publicado na Revista: LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 10, NO. 4, JUNE 2012