

Cômputo do campo elétrico irradiado por um canal de descarga atmosférica com ênfase no efeito do solo

Fábio O. M. Arruda Weberton L. G. Eller Marco Aurélio O. Schroeder

RESUMO – As descargas atmosféricas correspondem à maior causa de interrupções de energia e danos de equipamentos em sistemas elétricos. Para minimizar estes efeitos, as concessionárias têm instalado sistemas de localização de tempestades (SLT). Estes são constituídos por antenas que captam o campo irradiado pela descarga e, através de suas características, o ponto de ocorrência da descarga é determinado. Este artigo objetiva gerar uma contribuição da influência do solo na propagação do campo. Os resultados ilustram sua dependência em relação à resistividade do solo e frequências típicas das descargas, fatores determinantes para uma maior confiabilidade dos dados fornecidos pelas antenas do SLT.

Palavras Chaves – Canal de Descarga, Imagens Complexas, Sistemas de localização de tempestades, Antena e efeito do solo.

ABSTRACT – Lightning is the major cause of energy interruptions and damage of equipment in electrical systems. In order to minimize these effects the concessionaires have installed lightning localization systems (LLS). These are constituted by antennas, which receive the field radiated by the lightning and through its field characteristics the occurrence point is determined. This article has as objective to generate a contribution of ground influence in the field propagation. The results illustrate its dependence in relation to the ground resistivity and typical lightning frequencies, determinative factors to guarantee a bigger trustworthiness of the data supplied by the antenna of the LLS.

Keywords – Lightning channel, Complex Images, lightning location systems, Antenna and ground effect.

I. INTRODUÇÃO

Na década passada, modernos sistemas de localização de tempestades (SLT's) foram instalados em diversas partes do mundo para monitorar as descargas atmosféricas. Estes sistemas coletam diversas informações como, por exemplo, o pico da corrente da descarga, as suas coordenadas, o número de ocorrências e a polaridade. Hoje os SLT's estão se tornando uma ferramenta de operação diária indispensável para as concessionárias de energia elétrica [1, 2].

Em 1998, um Convênio de Cooperação Técnico-Científica, firmado entre a CEMIG (Companhia Energética

de Minas Gerais), a COPEL (Companhia Paranaense de Energia) através do SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná) e FURNAS (Furnas Centrais Elétricas S.A.), tornou possível a integração dos sistemas de detecção de descargas atmosféricas operados por estas empresas, formando a RIDAT - Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil [3]. Em 2003 com a inclusão do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) a rede passou a ser chamada RINDAT - Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas. Em área de monitoramento, a RINDAT do Brasil ocupa a terceira posição no mundo (as duas outras grandes redes existentes estão nos Estados Unidos e Canadá).

Atualmente, encontram-se instalados e em uso no Brasil dois tipos básicos de sensores (antenas): LPATS série III e IV e IMPACT. As diferenças entre os dois tipos de sensores estão, principalmente, na forma de processamento da localização das descargas e no número mínimo de sensores para identificação da descarga atmosférica [3].

Um dos principais elementos constituintes destes sensores são as antenas, cuja função é receber o campo eletromagnético irradiado pela descarga atmosférica. Os sinais destas antenas são transmitidos através de canal de comunicação dedicado para a central de processamento, onde são processados e distribuídos para unidades de visualização e armazenamento de dados.

Quando utilizam-se os dados fornecidos pelos sistemas de localização de tempestade, o desempenho destes sistemas é de grande importância para a localização da descarga. O desempenho é caracterizado por dois parâmetros: eficiência de detecção e exatidão da localização [4].

O exposto acima justifica o grande interesse e a intensa pesquisa dada a esta temática. Os autores estão envolvidos numa pesquisa que visa proporcionar uma contribuição para aumentar o desempenho dos algoritmos dos SLT's através do cômputo do efeito do solo no campo irradiado pela descarga atmosférica. Os SLT's utilizados atualmente desconsideram este efeito, causando uma possível imprecisão na localização da descarga.

O interesse em questão é intensificado quando se verifica que o adequado conhecimento do comportamento da radiação das descargas atmosféricas como um todo é essencial para o desenvolvimento de técnicas de proteção e prevenção. Em outras palavras, a compreensão dos mecanismos físicos das descargas por meio do estudo de sua radiação eletromagnética é fundamental para o avanço dos estudos nessa área e para a solução dos sérios problemas resultantes de sua interação com um mundo em pleno crescimento tecnológico [5, 6, 7, 8].

Fábio Oliveira Morais Arruda, Weberton Luiz Gonçalves Eller, alunos de Engenharia Industrial Elétrica; Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, professor do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica, Grupo de Eletromagnetismo Aplicado – GEAP, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, E-mails: fabiomorais@es.cefetmg.br, weberton@es.cefetmg.br, schroeder@des.cefetmg.br.

II. DESENVOLVIMENTOS

Em função da complexidade do sistema sob análise, adotou-se uma postura cartesiana e, assim, o problema foi dividido em etapas: inicialmente, considera-se um dipolo infinitesimal de corrente (dipolo de Hertz) em um meio infinito em todas as direções (homogêneo, isotrópico e linear). Determina-se, em seguida, uma expressão matemática para o campo eletromagnético. Posteriormente, considera-se o campo na região de campo distante (região de Fraunhofer), gerado pelo dipolo nas proximidades de um solo real (σ finito). Finalmente, o dipolo usado para os cálculos serve como elemento básico a partir do qual o campo eletromagnético irradiado por um canal de descarga pode ser calculado por integração. Esta integração foi realizada numericamente (quadratura gaussiana).

A. O dipolo de Hertz

O cômputo do campo eletromagnético gerado por um dipolo hertziano imerso em um meio sem perdas, realizado através da equação do potencial vetor (A_z) e do calibre de Lorentz, é amplamente divulgado na literatura [9]. O sistema físico em questão é apresentado na Figura 1, onde o comprimento de onda (λ) $\gg \ell$ (garantia de corrente uniforme no dipolo), $r \gg \ell$ (dipolo infinitesimal), $\ell \gg d$ (corrente concentrada no eixo do dipolo) e J_z é a densidade superficial de corrente. Os campos elétrico e magnético em qualquer ponto p (r, θ, ϕ) do espaço, distante r do centro geométrico do dipolo pode ser dado como [9]:

$$\vec{E}_r = \frac{\eta_0 I \ell \cos \theta}{2\pi} \left(\frac{1}{jKr^3} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-jKr} \hat{r} \quad (1),$$

$$\vec{E}_\theta = \frac{\eta_0 I \ell \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{1}{jKr^3} + \frac{1}{r^2} - \frac{K}{jr} \right) e^{-jKr} \hat{\theta} \quad (2) \text{ e}$$

$$\vec{H}_\phi = \frac{I \ell \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{jK}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-jKr} \hat{\phi} \quad (3),$$

onde $K = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ é a constante de fase e $\eta_0 = \sqrt{\mu / \epsilon}$ a impedância intrínseca do meio (μ corresponde à permeabilidade magnética e ϵ à permissividade elétrica) e $\omega = 2\pi f$ a frequência angular. As demais variáveis estão apresentadas na Figura 1.

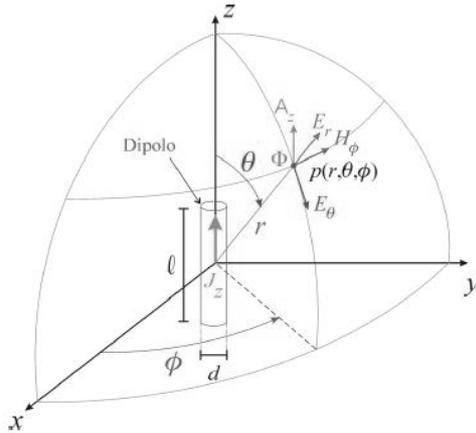


Figura 1: Dipolo de Hertz referenciado em um sistema de coordenadas esféricas (r, θ, ϕ).

O campo irradiado por um dipolo elétrico infinitesimal na região de Fraunhofer ($r \gg 2L^2/\lambda$) é computado fazendo-se nas equações (1,2,3) $Kr \gg \lambda$ [9, 10]:

$$\vec{E}_r = 0 \quad (4)$$

$$\vec{E}_\theta = \frac{jK \eta_0 I \ell \sin \theta e^{-jKr}}{4\pi r} \hat{\theta} \quad (5)$$

$$\vec{H}_\phi = \frac{jKI \ell \sin \theta e^{-jKr}}{4\pi r} \hat{\phi} \quad (6)$$

B. Dipolo na presença de um solo

Um obstáculo geralmente presente na propagação da onda eletromagnética é o solo, cuja superfície não é plana. No entanto, para simplificar as análises a superfície do solo é assumida ser plana e perfeitamente lisa.

Os campos elétrico e magnético gerados pelo dipolo acima de um plano de terra na região de campo distante podem ser obtidos com referência à Figura 2.

Nesta figura o meio 1 é o ar, o meio 2 é o solo; θ_i, θ_r e θ_t são, respectivamente, os ângulos de incidência, reflexão e transmissão; E_i, E_r e E_t são, respectivamente, os campos elétricos incidente, refletido e transmitido; H_i, H_r, H_t são, respectivamente, os campos magnéticos incidente, refletido e transmitido e K_i, K_r, K_t definem, respectivamente, as direções de propagação das ondas incidente, refletida e transmitida.

Na interface ($z = 0$), as condições de fronteira requerem que os componentes tangenciais dos campos E e H sejam contínuos. Através desta condição de contorno e das leis de Snell da reflexão e refração é possível determinar a relação entre os campos incidentes e refletidos, definindo-se, assim, o coeficiente de Fresnell para a reflexão (polarização do campo eletromagnético é paralela) [10]:

$$R = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (7),$$

onde: $\eta_1 = 377\Omega$ (impedância intrínseca do ar) e $\eta_2 = \sqrt{j\omega\mu_2 / (\sigma_2 + j\omega\epsilon_2)}$ (impedância intrínseca do solo); μ_2 é a permeabilidade magnética ($= \mu_0$), ϵ_2 é a permissividade elétrica e σ_2 a condutividade do solo.

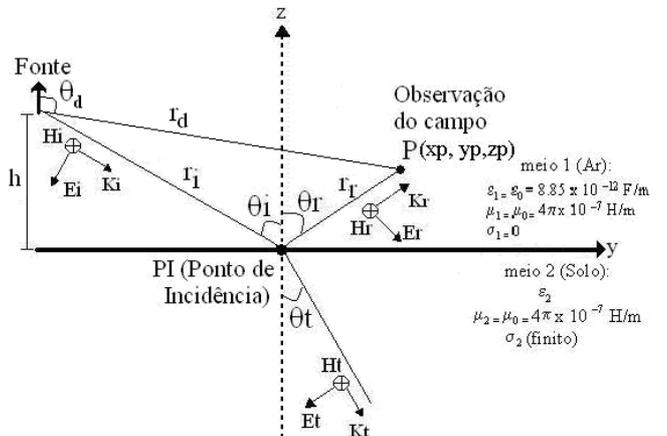


Figura 2: Propagação da onda eletromagnética, com polarização paralela, acima de um plano de terra.

O campo eletromagnético total acima do solo pode ser computado pela soma do campo direto (equações 5 e 6) com o campo refletido:

$$\vec{E}_\theta = \frac{jK_1\eta_1 I \ell}{4\pi} \left(\frac{\text{sen } \theta_d e^{-jK_1 r_d}}{r_d} \hat{\theta}_d - \frac{R \text{sen } \theta_r e^{-jK_1(r_i+r_r)}}{r_i+r_r} \hat{\theta}_r \right) \quad (8) \text{ e}$$

$$\vec{H}_\phi = \frac{jK_1 I \ell}{4\pi} \left(\frac{\text{sen } \theta_d e^{-jK_1 r_d}}{r_d} - \frac{R \text{sen } \theta_r e^{-jK_1(r_i+r_r)}}{r_i+r_r} \right) \hat{\phi} \quad (9),$$

onde, $\hat{\theta}_d$ é o vetor unitário na direção do ângulo θ_d relativo ao campo direto, $\hat{\theta}_r$ é o vetor unitário na direção do ângulo θ_r relativo ao campo refletido; r_i , r_r e r_d são, respectivamente, as distâncias da fonte ao ponto de incidência, do ponto de incidência ao ponto de cálculo (observação do campo) e da fonte ao ponto de observação.

Verifica-se pelas equações (8) e (9) que os campos são proporcionais a $\text{sen}(\theta)$. Considerando o sistema ilustrado na Figura 3 tem-se na interface ($z=0$) que θ_{id} está no segundo quadrante e que neste a função seno é positiva; assim, o campo tem a direção de $\hat{\theta}_{id}$.

Para satisfazer as condições de contorno, é necessário um componente de campo elétrico (Eim) numa direção conforme apresentada na Figura 3, onde r_i é igual a r_r . Portanto, verifica-se que o cômputo dos componentes de campo eletromagnético pode ser realizado com base no sistema equivalente apresentado na Figura 3, constituído por um meio infinito em todas as direções: o ar.

Assim, o campo eletromagnético é computado por dois dipolos: i) o dipolo real (altura h acima da interface) e ii) o dipolo imagem (altura h abaixo da interface), que traduz o efeito do solo. O dipolo abaixo do solo representa uma imagem complexa do dipolo real, expresso em função do coeficiente de Fresnel (R – equação (7)).

C. Sistema sob estudo

O sistema físico sob estudo corresponde a uma descarga atmosférica que incide no solo (plano de terra - σ finito). Esta descarga pode ser aproximada por um condutor retilíneo tendo como distribuição de corrente um modelo de linha de transmissão modificada (MTL) [11].

A Figura 4 esboça o sistema físico, onde L é o comprimento do canal de descarga composto por vários dipolos infinitesimais de corrente.

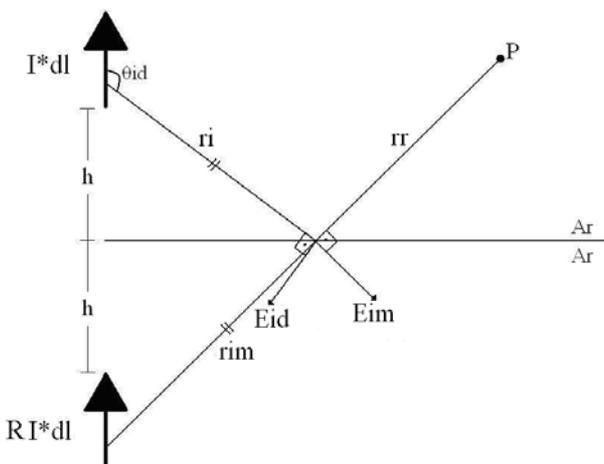


Figura 3: Configuração equivalente para o sistema físico real - imagem complexa do dipolo.

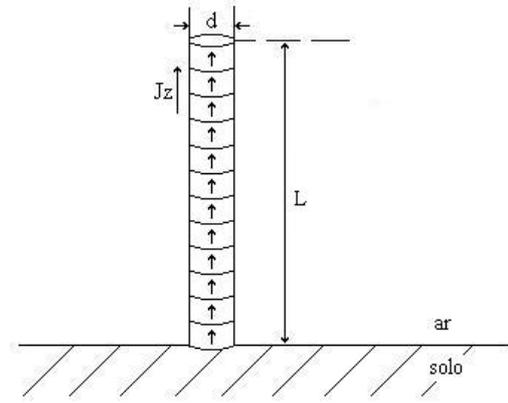


Figura 4: Configuração do sistema sob estudo - canal de descarga atmosférica.

Neste modelo a corrente inicia no nível do solo e viaja para cima com uma velocidade constante v ; sua amplitude decai exponencialmente com o aumento da altura da seguinte forma: $\exp(-h/\lambda)$, onde λ é a constante de decaimento [12].

Neste trabalho assume-se que a corrente no solo possui amplitude I_0 . No domínio da frequência a corrente ao longo do canal de descarga pode ser escrita como [12]:

$$I(L, j\omega) = \frac{I_0}{j\omega} e^{-L.(j\omega/v + 1/\lambda)} \quad (10)$$

O campo eletromagnético total (gerado pela corrente no canal de descarga) é computado por meio de uma superposição dos diversos dipolos que compõem o canal; os campos de cada dipolo são aqueles expressos nas equações (8) e (9). Nesta região a onda eletromagnética gerada pelo canal de descarga pode ser considerada localmente plana, sendo possível utilizar as leis de Snell (da reflexão e refração) e os coeficientes de Fresnel para se estabelecer o comportamento da onda eletromagnética na presença do solo.

III. RESULTADOS

Inicialmente, foram realizadas diversas análises de sensibilidade para um dipolo hertziano, na região de campo distante. A Figura 5 ilustra o dipolo sob estudo, com a seguinte geometria e parâmetros eletromagnéticos: i) $h = 10$ m (altura do dipolo em relação ao solo); ii) coordenadas do ponto de observação do campo P (4 m, 1 m, 0 m); iii) $\eta_1 = 377 \Omega$ como já definido; iv) solo com resistividade ($\rho_2 = 1/\sigma_2$) variando de 100 a 20000 $\Omega.m$ e $\epsilon_2 = 50\epsilon_0$ (valores

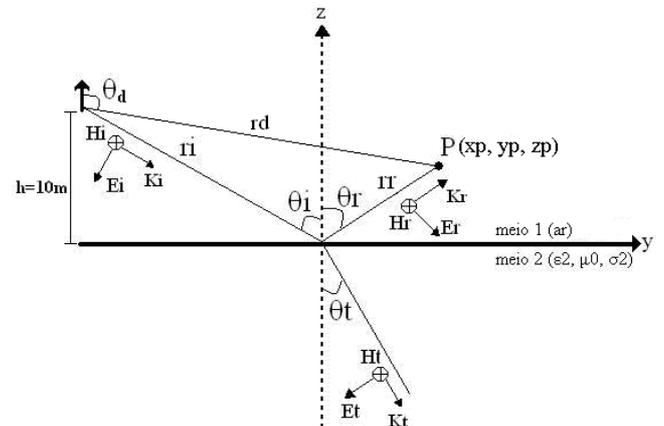


Figura 5: Configuração geométrica do sistema sob estudo: dipolo elétrico acima de um plano de terra

típicos) [3]; v) frequências típicas (f) de descargas atmosféricas (10 KHz – 10 MHz) [7]. Como já frisado, η_2 depende de f e de ρ . Com a escolha de h e P , as demais variáveis geométricas da Figura 5 são automaticamente determinadas.

A Figura 6 ilustra a variação da intensidade de campo elétrico (por unidade de I_{xdl}) com ρ , para quatro valores de frequência (10 KHz, 500 KHz, 1 MHz e 10 MHz), enquanto a Figura 7 mostra a sensibilidade dos componentes horizontal e vertical do campo elétrico (em relação ao solo), por unidade de I_{xdl} , considerando as mesmas variações para ρ e para 3 valores de frequência (10 KHz, 500 KHz, 10 MHz). Com base nestas figuras pode-se tecer as seguintes observações:

- O campo elétrico, para frequências relativamente baixas (da ordem de até 100 KHz), sofre significativa influência da resistividade do solo. Para frequências relativamente altas (acima de 100 KHz) mantém-se aproximadamente constante. Evidentemente, sua intensidade aumenta com a frequência e diminui com a resistividade.
- Para valores de resistividade até 1.500 $\Omega.m$ e frequências da ordem de 500 KHz o componente horizontal do campo elétrico sofre maior influência do solo quando comparada com o vertical. A intensidade do campo elétrico na direção horizontal é menor quando comparada com a vertical, para todo o espectro de frequência e valores de resistividade considerados.

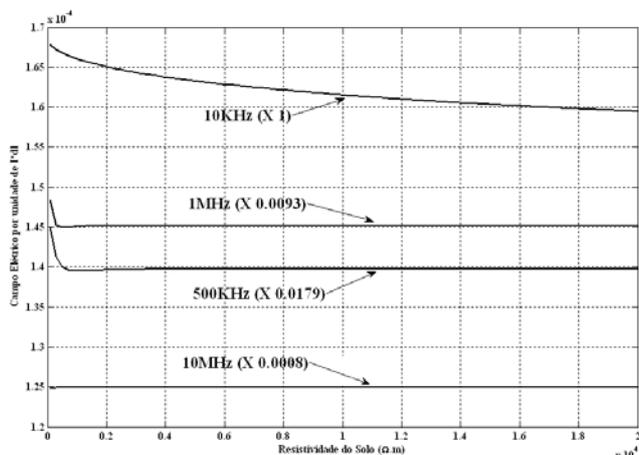


Figura 6: Valores de E, gerado pelo dipolo, versus ρ para 4 frequências.

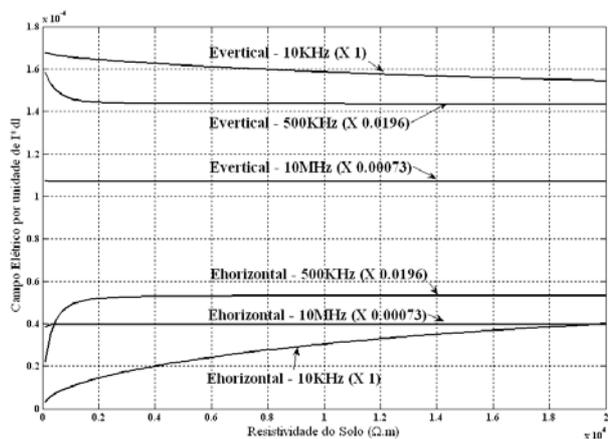


Figura 7: Variação de Evertical e Ehorizontal, gerados pelo dipolo, versus ρ para 3 frequências.

- O componente horizontal aumenta com a resistividade, enquanto o vertical diminui. Este fato é de fundamental importância, uma vez que à medida que a resistividade aumenta o solo distancia da aproximação de condutor elétrico perfeito.

Tendo como objetivo a validação destes resultados buscou-se na literatura modelos condizentes com o sistema físico apresentado neste trabalho [9,13]. Dessa forma gerou-se a Figura 8 para comparação e uma maior análise de sensibilidade. A figura ilustra o diagrama de radiação da potência relativa (normalizada para zero dB) em função do ângulo teta (θ) com a vertical: i) os valores de potência são expressos em dB; ii) $h = \lambda/4$ m (altura do dipolo em relação ao solo); iii) raio de observação do campo na região de Fraunhofer; iv) frequências com valores de 500 KHz, 1 MHz, 10 MHz e 1 GHz; v) solo com valores de resistividades ($\rho = 1/\sigma$) de 0, 100 e 3000 $\Omega.m$ com $\epsilon_2 = 5\epsilon_0$. Como o lóbulo de radiação possui simetria em relação à vertical plotou-se as curvas de cada frequência em apenas um quadrante do plano polar. Com base nesta figura pode-se observar:

- O diagrama normalizado de radiação de potência praticamente não varia com a frequência quando o solo é considerado um condutor elétrico perfeito (CEP), pois a altura varia inversamente com a frequência ($h = \lambda/4$) e a potência está normalizada.
- Na presença do solo (σ finito), a radiação para direções compreendidas entre 0° e 60° são mais intensas que para o CEP, mas desaparece para ângulos próximos de 90° , pois o coeficiente de reflexão (R) dado pela equação (7) aproxima-se de -1 ($\theta_i \rightarrow 90^\circ$).
- O comportamento da radiação do dipolo nas curvas da figura condiz com os resultados esperados (Figuras 6 e 7), sendo os efeitos do solo no diagrama de uma antena polarizada verticalmente significativamente diferentes daqueles de um CEP.

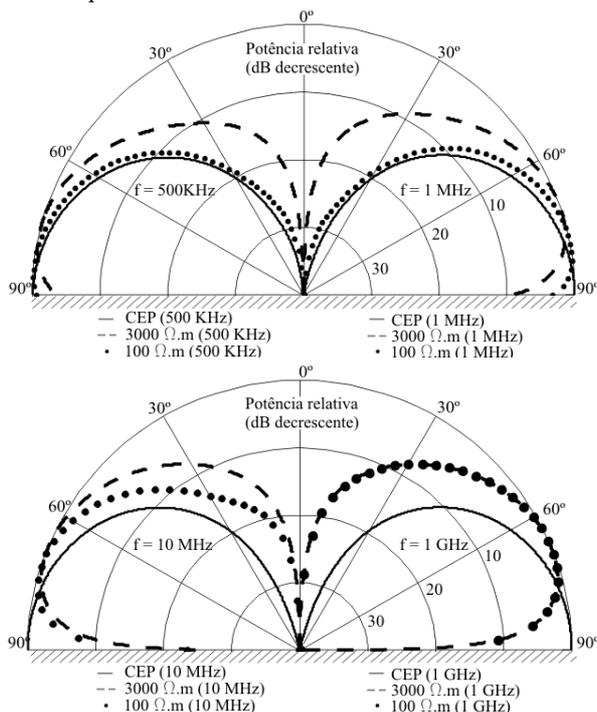


Figura 8: Padrão normalizado de radiação de potência de um dipolo infinitesimal acima de um solo.

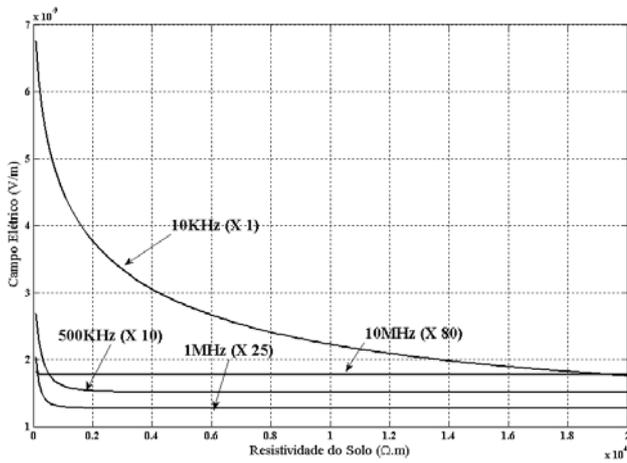


Figura 9: Valores de E, gerado pelo canal de descarga, versus ρ para 4 frequências.

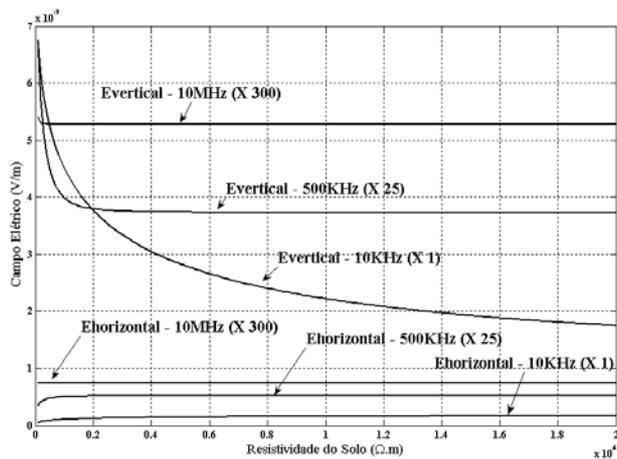


Figura 10: Variação de Evertical e Ehorizontal, gerados pelo canal de descarga, versus ρ para 3 frequências.

Posteriormente, foram realizadas análises de sensibilidade considerando o canal de descarga descrito no item I-C (vide Figura 4): i) $L = 300$ m; ii) distribuição de corrente conforme definida na equação (10); iii) velocidade da onda de corrente igual a $1,1 \times 10^8$ m/s [12]; iv) coordenadas do ponto de observação P (4500 m, 4500 m, 0 m). Os resultados são apresentados nas Figuras 9 e 10.

As seguintes conclusões podem ser extraídas:

- A influência do solo no campo elétrico apresenta características similares às do dipolo infinitesimal, ou seja, para frequências relativamente altas o campo não sofre variação significativa com a resistividade do solo. Contudo, observa-se que quanto maior o valor da frequência menor é o valor do campo elétrico irradiado. Este fato decorre do modelo assumido para a distribuição de corrente ao longo do canal de descarga [12].
- Para valores de resistividade abaixo de $1.000 \Omega \cdot m$ o componente vertical do campo elétrico sofre, ao contrário do que acontece no dipolo, maior influência da resistividade do solo quando comparado ao horizontal.
- De forma similar à do dipolo, para o canal de descarga o componente horizontal aumenta com a resistividade, enquanto o vertical diminui.
- De um modo geral, o campo elétrico irradiado tanto pelo dipolo como pelo canal de descarga,

sofre significativa influência da resistividade do solo para frequências relativamente baixas.

Estes resultados são de fundamental importância, haja visto que parte da literatura e os algoritmos utilizados nos SLT's atualmente desprezam o efeito do solo na propagação do campo eletromagnético gerado pelo canal de descarga [14, 15, 16].

IV. CONCLUSÕES

Atualmente a utilização de SLT's tem aumentado bastante pelas concessionárias de energia elétrica devido a sua importância na capacidade de monitoramento de descargas atmosféricas. O cálculo preciso do campo eletromagnético irradiado pela descarga atmosférica consiste num importante fator na confiabilidade da informação fornecida por este sistema.

Ao longo do trabalho quantificou-se os campos na região de Fraunhofer gerados por um canal de descarga nas proximidades de um solo real, cujo efeito nas ondas irradiadas foi computado com o auxílio de imagens complexas (que quantificam o efeito do solo) devidamente posicionadas em um sistema equivalente ao sistema físico real. Estes campos foram obtidos em função de parâmetros geométricos e eletromagnéticos com base nas Equações de Maxwell, nas leis de Snell e nos coeficientes de Fresnel. Por meio das formulações e simulações desenvolvidas, obteve-se o comportamento das ondas eletromagnéticas em função de várias resistividades típicas do solo brasileiro e valores de frequências características de descargas atmosféricas. Os resultados ilustram a grande dependência dos campos em relação à resistividade do solo, normalmente desprezada nos algoritmos dos SLT's.

A despeito das simplificações efetuadas ao longo do trabalho, tais como, solo plano e perfeitamente liso, consideração de onda eletromagnética localmente plana, desconsideração da onda superficial e outros, os autores têm a expectativa de que os estudos apresentados neste artigo possam suscitar discussões técnicas e pesquisas adicionais, tendo em vista a importância do efeito do solo no cômputo do campo eletromagnético gerado pelas descargas atmosféricas.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Carvalho, M. S. Abreu, A. C. Filho, A. C. Carvalho, L. C. L. Cherchiglia e J. H. Diniz (1999), *Tecnologias para Análise e Melhoria do Desempenho de Instalações de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas*. XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Paraná-Brasil.
- [2] S. M. Chen, Y. Du, L. M. Fan, H. M. He, and D. Z. Zhong (2002). *A Lightning Location System in China: Its Performances and Applications*. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, nº. 4.
- [3] Cherchiglia, L. C.L./ Carvalho, A.M./ Diniz, J.H./ Souza, V.J. (1998). *Lightning Program Carried out by Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG*. International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'98), pp. 1-5.
- [4] K. P. Naccarato, (2001). *Estudo de Relâmpagos no Brasil com base na Análise de Desempenho do Sistema de Localização de Tempestades*. Dissertação de Mestrado. INPE, São José dos Campos.
- [5] Soares, A. (2001). *Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho Frente às Descargas Atmosféricas*. Tese de Doutorado. CPDEE/UFMG, Belo Horizonte.
- [6] Schroeder, M. A. O. (2001). *Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo*. Tese de Doutorado. CPDEE/UFMG, Belo Horizonte.
- [7] Visacro, S. F., A. Soares, M. A. O. Schroeder, L. C. L. Cherchiglia and V. J. Souza (2004). *Statistical Analysis of Lightning Currents*

Parameters: Measurements of Morro do Cachimbo Station. Journal of Geophysical Research, vol. 109, n°. D0 1105, pp.1-11.

- [8] Soares, A., S. F. Visacro and M. A. O. Schroeder (2005). *Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes.* IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 20, n°. 02.
- [9] Balanis, C. A. (1997). *Antenna theory: analysis and design.* J. Wiley, New York.
- [10] Balanis, C. A. (1989). *Advanced engineering electromagnetics.* J. Wiley, New York.
- [11] Nucci, C. A., C. Mazzetti et al. (1988). *On lightning return stroke models for LEMP calculations.* In: 19th Int. Conf. Lightning Protection, Graz.
- [12] Hoidalén, H.K., J. Sletbak and T. Henriksen (1997). *Ground effects on induced voltages from nearby lightning.* Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions; Volume 39, Pag(s):269 – 278.
- [13] Dong-Ho Han, A. C. Polycarpou and C. A. Balanis, *Ground Effects for VHF/HF Antennas on Helicopter Airframes;* Antennas and Propagation, IEEE Transactions on Volume 49, Issue 3, March 2001 Page(s):402 - 412
- [14] Rakov, V. A. and M. A. Uman (1998). *Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application.* IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. Vol. 40, n°. 04, pp 403-426.
- [15] Silveira, F. H., A. R. Conti, S. Visacro, J. V. P. Duarte (2003). *Qualidade de Energia em Unidades Consumidoras: Análise da Influência das Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas.* XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia.
- [16] Silveira, F. H., S. Visacro, A. Soares, M. A. O. Schroeder, A. R. Conti and M. H. M. Vale (2002). *The Influence of Transmission Line Configuration on the Amplitude of Lightning Induced Overvoltages.* Proceedings 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cracóvia, Polónia.