



**XX SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FORMULAÇÕES DE MEDIÇÃO DE VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA PERMISSIVIDADE DE SOLOS TÍPICOS COM A FREQUÊNCIA

Rafael Silva Alípio(*)
Dep. Eng. Elétrica
CEFET-MG

Adriana G. Pedrosa
Dep. Eng. Elétrica
CEFET-MG

Marco Aurélio O. Schroeder
Dep. Eng. Elétrica
CEFET-MG

Roberta K. Oliveira
Dep. Eng. Elétrica
CEFET-MG

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da sensibilidade da sobretensão, no ponto de injeção de corrente, e da impedância impulsiva de eletrodos de aterramento em relação à consideração da variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo (condutividade e permissividade) com a frequência. Para tal, foram utilizadas duas metodologias de medição amplamente divulgadas na literatura. Os resultados ilustram que, com a consideração da variação com a frequência, o valor de pico da tensão transitória e, conseqüentemente, da impedância impulsiva são sensivelmente menores quando comparados com aqueles em que os parâmetros do solo são modelados sem a dependência com a frequência.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramentos Elétricos, Variação da condutividade e da permissividade de solos com a frequência, Descargas Atmosféricas, Transitórios Eletromagnéticos

1.0 - INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico é elemento essencial nos sistemas elétricos e apresenta singular importância para o bom desempenho do sistema aterrado e, principalmente, para segurança de seres vivos. O projeto de aterramentos para solicitações lentas (frequência industrial de 60 Hz) está relativamente bem estabelecido e segue, em geral, as orientações da norma internacional IEEE Std 80 (1). Contudo, o comportamento do aterramento quando solicitado por correntes impulsivas devido às descargas atmosféricas é ainda motivo de dúvidas, que podem conduzir à proposição de soluções inadequadas e a conclusões precipitadas e errôneas. Salienta-se que as descargas atmosféricas são responsáveis pelas principais solicitações dos aterramentos elétricos e pela maior parcela de desligamentos não programados das linhas de transmissão.

Um aspecto essencial no estudo e simulação de sistemas de aterramento é a modelagem adequada do solo. Exceto para valores elevados de campo elétrico, que causam significativa ionização do meio, o comportamento eletromagnético do solo é essencialmente linear, mas com significativa dependência da condutividade elétrica (σ) e permissividade elétrica (ϵ) em relação à frequência (2), (3). A permeabilidade magnética (μ) é, em geral, praticamente igual à permeabilidade magnética do vácuo (μ_0). Para uma configuração de aterramento, os parâmetros determinantes da forma de propagação do campo eletromagnético associado a uma onda de corrente injetada, em condições em que não há a ocorrência significativa de fenômenos não-lineares, são σ , ϵ e μ .

(*) Rua Piratininga, nº 370 – CEP: 30.240-550. Contagem, MG, – Brasil
Tel: (+55 31) 8844-5118 – Email: rafael.alipio@gmail.com

Nesse sentido, a determinação do comportamento de tais parâmetros de forma mais próxima possível da realidade é fundamental para o estudo completo do sistema de aterramento.

Este trabalho tem por objetivo principal ilustrar os efeitos significativos nos resultados de simulação de aterramentos quando é incluída a dependência dos parâmetros do solo com a frequência. É objetivo, ainda, dos autores incitar uma discussão entre pesquisadores e engenheiros da indústria acerca da importância da inclusão dessa variação dos parâmetros do solo e também sobre a veracidade ou não do papel de “vilão” desempenhado pelos sistemas de aterramento, uma vez que a maior parte dos problemas reportados pelas empresas, em suas instalações, são devidos a aterramentos.

Na seção 2 deste trabalho é descrita de maneira bastante sucinta a modelagem adotada para simulação de aterramento. Na seção 3 são apresentadas as formulações adotadas para quantificação da variação dos parâmetros do solo com a frequência. Na seção 4 são apresentados resultados de simulação que contemplam tensão transitória no ponto de injeção e impedância impulsiva. Tais resultados ilustram os efeitos significativos da inclusão da dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Ao fim, na seção 5, são apresentadas as principais conclusões e implicações de ordem prática deste trabalho.

2.0 - MODELAGEM DE ATERRAMENTOS PARA FENÔMENOS RÁPIDOS

O modelo empregado nas simulações é oriundo da aplicação direta das equações do eletromagnetismo a condutores metálicos cilíndricos, que correspondem às aplicações práticas de interesse. A modelagem é desenvolvida no domínio da frequência, o que a torna adequada para estudos de aterramentos solicitados por correntes impulsivas com a inclusão da variação dos parâmetros do solo ao longo do espectro de frequência típico de descargas atmosféricas (100 Hz a 2 MHz). A resposta no domínio do tempo é obtida por meio de uma transformada inversa de Fourier. Detalhes teóricos do modelo, comparações com resultados experimentais e aplicações podem ser encontrados em (4)-(9).

Na abordagem adotada, os eletrodos são divididos em diversos elementos. Cada elemento é considerado fonte de uma corrente transversal I_T que dispersa do condutor em direção ao solo e de uma corrente longitudinal I_L que circula ao longo do segmento (7), (10), (11). A corrente I_T gera um campo elétrico de natureza divergente que estabelece uma elevação de potencial em relação ao infinito no próprio elemento e nos demais (7), (10), (11). A corrente I_L gera um campo elétrico não conservativo que estabelece uma queda de tensão no próprio elemento e nos demais (8), (9). Considerando um par de elementos, a corrente I_T promove os acoplamentos capacitivo e condutivo (próprio e mútuo) entre eles e a corrente I_L promove os acoplamentos indutivo e resistivo (próprio e mútuo). Esses acoplamentos são computados a partir da definição das impedâncias transversal $Z_{T_{kj}}$ e longitudinal $Z_{L_{kj}}$ entre os elementos, onde o índice k se refere ao elemento receptor e o índice j se refere ao elemento emissor de campo (7), (10), (11). A solução final é obtida a partir da aplicação do método dos momentos e do estabelecimento de relações entre os potenciais nodais e médio em cada elemento e entre as correntes transversal e longitudinal nos nós (6)-(9).

As expressões resultantes da modelagem descrita no parágrafo anterior são dependentes dos parâmetros do solo μ , σ e \mathcal{E} , sendo que os dois últimos variam significativamente ao longo do espectro típico de descargas atmosféricas. A seção a seguir apresenta formulações para determinação dessa variação.

3.0 - VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DA PERMISSIVIDADE DO SOLO COM A FREQUÊNCIA

Um dos principais quesitos para um estudo adequado dos fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência é a representação apropriada dos efeitos do aterramento. As considerações feitas pela maior parte dos procedimentos não estima a variação da condutividade e da permissividade do solo com a frequência. Tais considerações não condizem com a realidade e podem originar um modelo impróprio do solo para as mais diversas aplicações em aterramentos, principalmente para fenômenos transitórios (rápidos e altas frequências), como no caso de ocorrência de descargas atmosféricas.

A presente seção interessa apresentar, sobretudo, como a constante dielétrica \mathcal{E} e a condutividade do solo σ se comportam na faixa de frequências dominantes em descargas atmosféricas (de 100 Hz a 2 MHz). Para tanto, é feito o estudo do estado da arte de trabalhos que tratam sobre medição e modelagem dos parâmetros elétricos do solo para a faixa de frequência em questão.

Em 1987, em (2), foi proposto um método empírico para a modelagem da variação da resistividade e da permissividade de solos com a frequência, que resultaram nas seguintes relações matemáticas aproximadas (equações 1 e 2):

$$\rho \cong \rho_{100\text{Hz}} \left(\frac{100}{f} \right)^{0,072} \Leftrightarrow \sigma = 1/\rho \quad (1)$$

$$(2)$$

$$\varepsilon_r \equiv 2,34 \times 10^6 (\rho_{100\text{Hz}})^{-0,535} \cdot f^{-0,597}$$

onde:

- $\rho_{100\text{Hz}}$ é a resistividade do solo medida em 100Hz;
- ρ é a função com a frequência da resistividade do solo;
- ε_r é a função com a frequência da permissividade relativa do solo.

Posteriormente, em 1999, foi apresentado em (3) um trabalho a respeito de procedimentos para medir e modelar parâmetros eletromagnéticos do solo no domínio da frequência. A equação resultante do novo estudo do solo é dada pela equação 3:

$$\sigma_{\text{solo}} \pm i\omega \varepsilon_{\text{solo}} = \sigma_0 + \Delta_i \left[\cot \text{an} \left(\frac{\pi}{2} \alpha \right) \pm i \right] \times \left(\frac{\omega}{2\pi \times 10^{-6}} \right)^\alpha \quad (3)$$

onde:

- σ_0 é a condutividade elétrica do solo medida em baixa frequência;
- α é parâmetro do modelo do solo;
- Δ_i é o valor de $\omega\varepsilon$ a 1MHz;
- σ_{solo} é a condutividade do solo em função da frequência;
- $\varepsilon_{\text{solo}}$ é a permissividade do solo em função da frequência;

Os valores de α e Δ_i são obtidos por meio de medições, conforme a referências (3), (4), (5), (7).

Para uma melhor avaliação dos trabalhos acima citados foi feita, por meio de rotina computacional, uma comparação entre as formulações apresentadas para caracterização da dependência da frequência dos parâmetros eletromagnéticos do solo. Os valores de α e Δ_i utilizados nesta rotina foram os medianos, que valem 0,706 e 11,71 mS/m, respectivamente (3), (4), (5), (7).

A Figura 1 apresenta o gráfico da variação da condutividade de acordo com os referidos autores. Em cada caso considerou-se solos cujas resistividades, para a faixa de frequência industrial, eram de 100 Ω .m e 1000 Ω .m. Vale frisar que estas relações matemáticas são válidas para solos cuja resistividade em baixas frequências está compreendida entre 100 Ω .m a 10.000 Ω .m, conforme (3), (4), (5), (7).

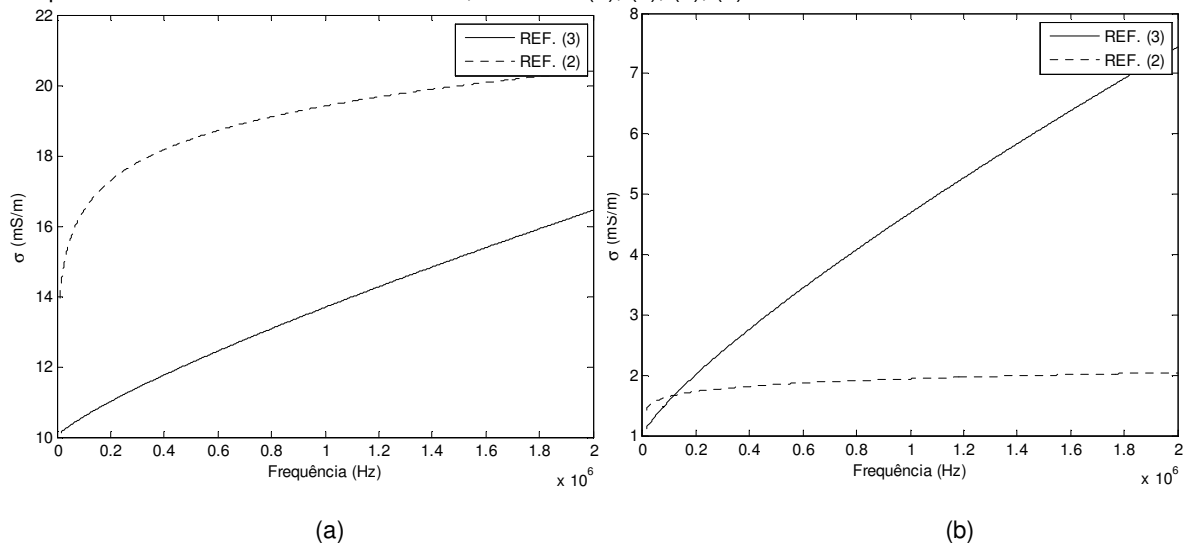


FIGURA 1 - Variação da condutividade do solo com a frequência para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 100\Omega$.m, e (b) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 1000\Omega$.m

Após a análise, que considerou frequências entre 100 Hz e 2 MHz (característica de descargas atmosféricas), observou-se diferenças significativas entre os resultados obtidos pelos trabalhos (2) e (3). A formulação apresentada em (3) sugere uma dependência da condutividade com a frequência muito maior do que a sugerida por (2), principalmente para altos valores da resistividade do solo para baixa frequência (1000 Ω .m). Para este último caso, a diferença entre as duas metodologias é próxima a 73 % no final do espectro de frequência, conforme verificado na Figura 2.

Situação semelhante ocorre na avaliação da variação da permissividade, conforme visto na Figura 3. Novamente, verifica-se uma considerável discrepância entre as duas metodologias. Para ambos casos não é prudente

desconsiderar a parcela $\omega\epsilon$ na composição de corrente no solo, principalmente na faixa superior do espectro de frequência.

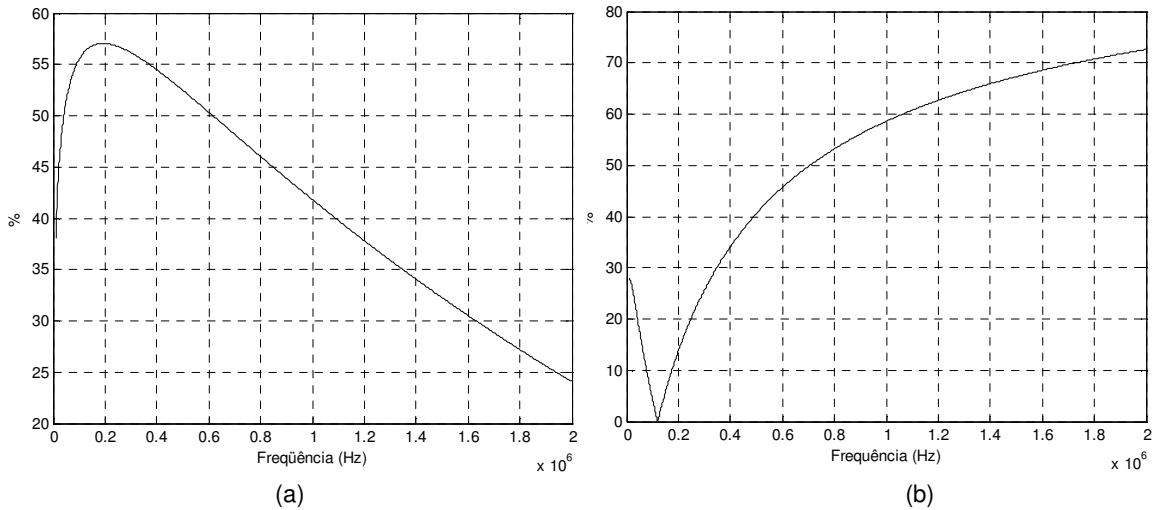


FIGURA 2 – Diferença percentual entre as equações de condutividade do solo para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 100\Omega.m$, e (b) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 1000\Omega.m$.

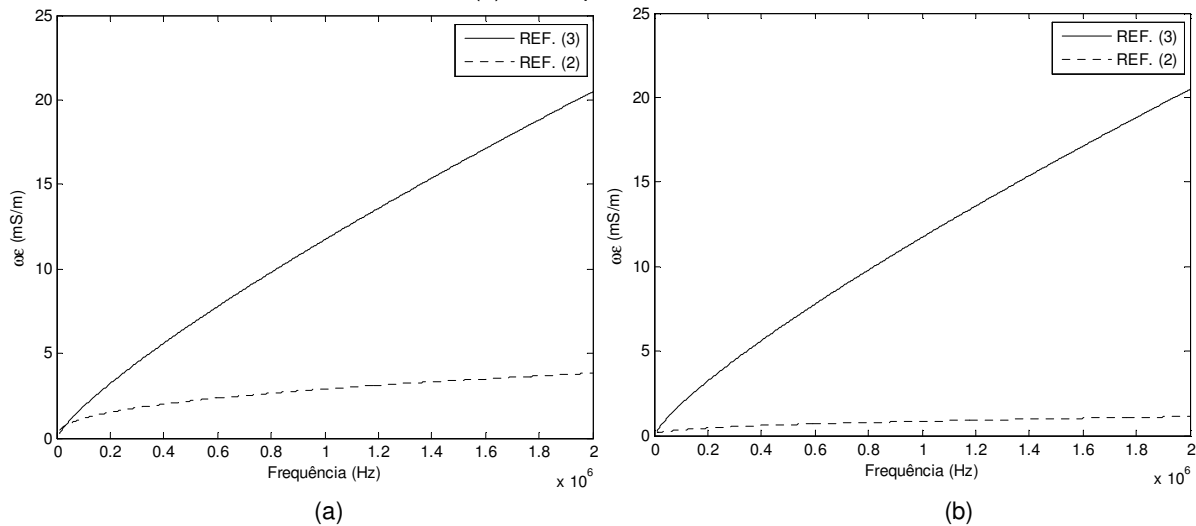


FIGURA 3 – Variação da permissividade do solo em função da frequência para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 100\Omega.m$, e (b) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 1000\Omega.m$.

A diferença entre os valores de permissividade entre as duas metodologias é próxima à 95% em solos de maior resistividade (ver Figura 4).

A variação da condutividade e da permissividade do solo com a frequência influencia diretamente a constante de propagação γ , que determina a atenuação e defasamento de campo eletromagnético (equação 4).

$$\gamma = \sqrt{i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)} = \alpha + \beta i \quad (4)$$

A parcela real α , ou constante de atenuação, caracteriza o amortecimento da amplitude das ondas de tensão ou corrente no solo. A Figura 5 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** mostra a variação da constante de atenuação com a frequência, considerando as variações também dos parâmetros σ e ϵ com a frequência propostas em (2) e (3). Para solos com baixo valor de resistividade medida a 100 Hz, a formulação sugerida em (3) assumi comportamento mais conservador, aproximando-se da curva que representa a variação de α com a frequência, mas que considera a condutividade e a permissividade constantes ($\sigma = 0,01\text{S/m}$ e $0,001\text{S/m}$, e $\epsilon_r = 15$). No entanto, para solos com alto valor de resistividade medida a 100 Hz o quadro se inverte e α cresce vertiginosamente com o aumento da frequência.

O valor da parcela imaginária da constante de propagação, β , representa a variação de fase das ondas de tensão ou corrente durante a propagação. Ela também é dependente da frequência, conforme a Figura 6, sendo a

formulação em (3) a de variação mais acentuada. O valor da constante de fase, β , não altera de forma significativa com a mudança do valor da resistividade do solo em baixa frequência, como pode ser verificado na Figura 6. É importante salientar que as formulações aqui citadas para cômputo da condutividade e da permissividade do solo sofrem acentuado efeito em razão do tipo de solo utilizado em cada metodologia experimental. Isto acarreta dificuldade em se obter um modelo geral para quantificação dos parâmetros do solo com a frequência.

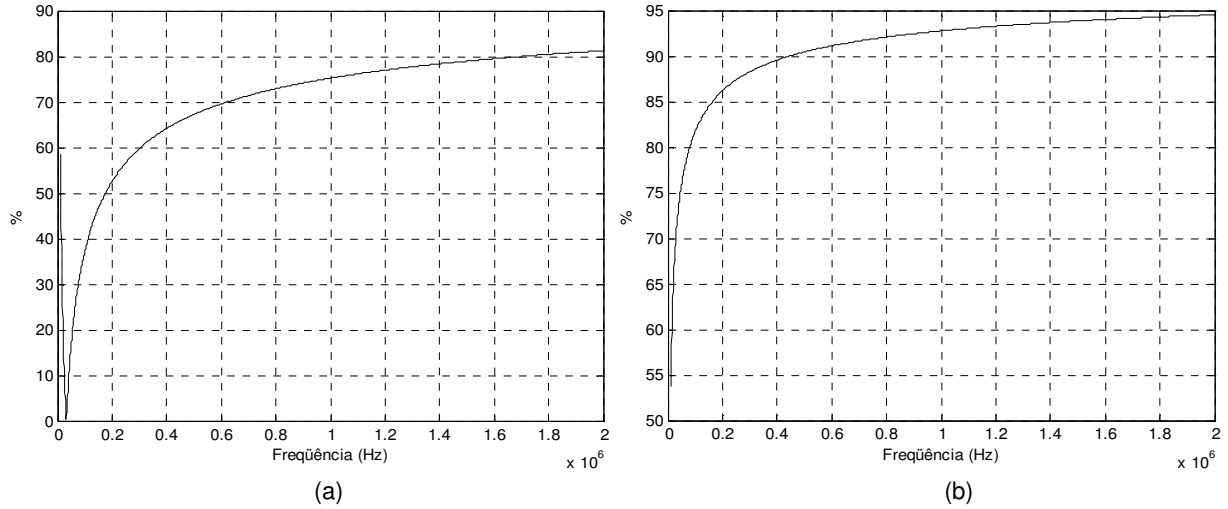


FIGURA 4 – Diferença percentual entre as equações de permissividade do solo para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 100\Omega.m$, e (b) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 1000\Omega.m$

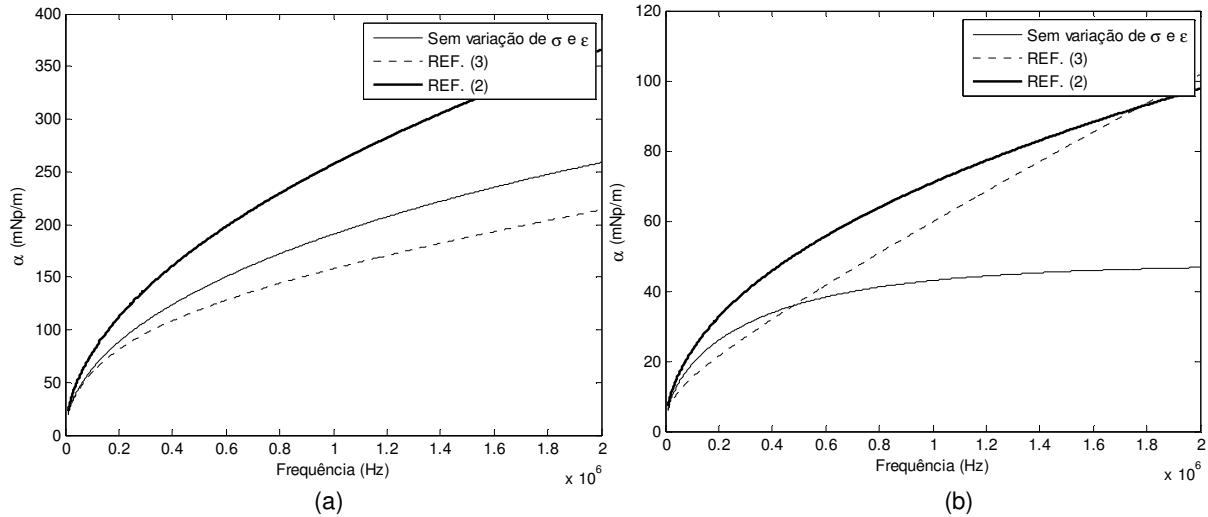


FIGURA 5 – Variação de α considerando a variação de σ e ϵ com a frequência para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 100\Omega.m$, e (b) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 1000\Omega.m$

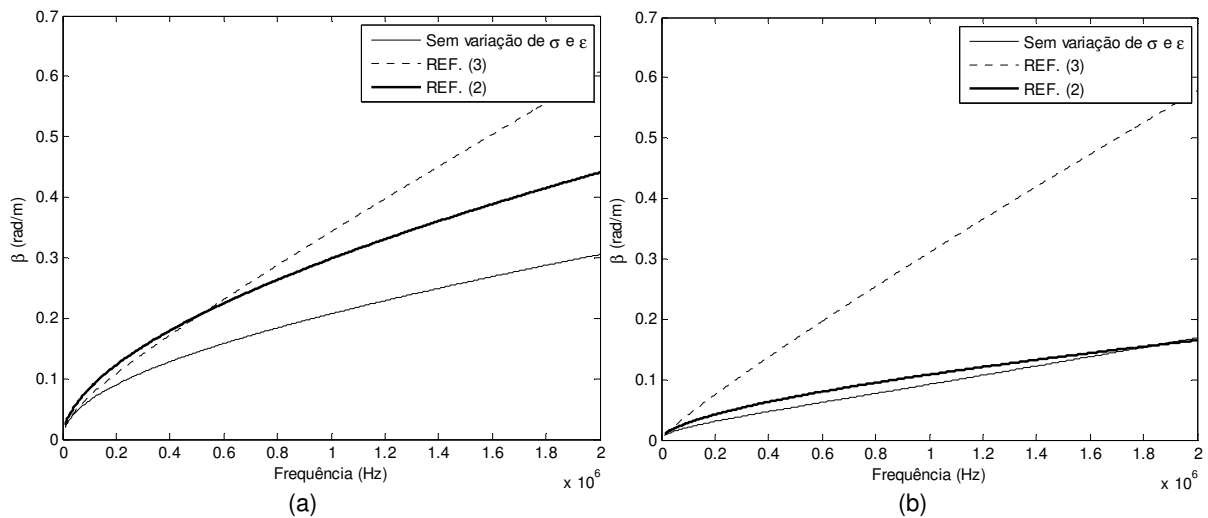


FIGURA 6 – Variação de β considerando a variação de σ e \mathcal{E} com a frequência para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 100\Omega\cdot\text{m}$, e
(b) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 1000\Omega\cdot\text{m}$

Por todo o exposto é possível verificar a importância fundamental da consideração da variação de σ e \mathcal{E} com a frequência, pois altera de forma substancial:

- a composição de corrente no solo (condução e deslocamento) ao longo do espectro de frequência, cujo efeito se traduz na redução da impedância de aterramento;
- a propagação do campo eletromagnético ao longo do espectro de frequência (α e β).

Tais alterações influenciam de forma significativa algumas grandezas de aterramentos elétricos, como por exemplo, sobretensão e impedância impulsiva (conforme apresentado na seção 4).

4.0 - RESULTADOS

Nesta seção são apresentados dois tipos de resultados para avaliação da influência da inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência. Na seção 4.1 são ilustrados gráficos da tensão transitória no ponto de injeção de corrente e na seção 4.2 são calculados os valores de impedância impulsiva. A configuração simulada consiste em um eletrodo horizontal de 70 m e raio igual a 1 cm, enterrado a uma profundidade de 0,5 m. São adotados três modelos para o solo: Solo 1 – representado por seu valor de condutividade σ_0 medido em baixa frequência e uma permissividade relativa $\epsilon_r = 15$; Solo 2 – solo com a inclusão da variação com a frequência de σ e \mathcal{E} de acordo com as expressões (1) e (2) e mesmo valor de condutividade em baixa frequência adotado para o Solo 1; Solo 3 – solo com a inclusão da variação com a frequência de σ e \mathcal{E} de acordo com a expressão (3) (com valores de α e Δi iguais a 0,706 e 11,71 mS/m, respectivamente) e mesmo valor de condutividade em baixa frequência adotado para o Solo 1. A injeção de corrente é realizada na extremidade do eletrodo e consiste em uma onda do tipo dupla exponencial com tempo de frente de 1,2 μs , tempo de cauda de 50 μs e amplitude de 1 kA.

4.1 Tensões transitórias no ponto de injeção

A avaliação das tensões transitórias desenvolvidas no aterramento é de fundamental importância, uma vez que revela parâmetros de grande importância prática, como, por exemplo, a tensão máxima a que fica submetido o aterramento quando da incidência da descarga atmosférica e o instante de tempo em que esse máximo ocorre. Ademais, pode-se avaliar o tempo a que o aterramento fica submetido a determinados níveis de tensão.

A (A)

(B)

Figura 7 ilustra os gráficos de tensão transitória resultante na configuração anteriormente descrita para dois valores de condutividade em baixa frequência: $\sigma_0 = 1/100 \text{ S/m}$ (Figura 7(a)) e $\sigma_0 = 1/1000 \text{ S/m}$ (Figura 7(b)). É notável o efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência, que influencia não apenas a amplitude, mas a forma da onda de tensão resultante. O valor de pico da onda de tensão é reduzido nas simulações em que a variação dos parâmetros do solo é incluída. Tal efeito é prontamente compreendido uma vez que, conforme já comentado, um dos efeitos previstos quando da inclusão da dependência dos parâmetros do solo com a frequência corresponde à redução da impedância de aterramento. Observa-se que o efeito na redução da amplitude máxima de tensão é mais pronunciado para o modelo Solo 2 no solo mais condutivo (em baixa frequência) e para o modelo Solo 3 no solo menos condutivo (em baixa frequência). Essa observação corrobora os resultados apresentados na seção anterior, em que para baixos valores de resistividade do solo em baixa frequência, a formulação sugerida em (3) assume um menor crescimento da condutividade com a frequência. Nota-se, ainda, a alteração da forma da onda de tensão resultante, principalmente no modelo Solo 3. Esse fato também está em concordância com os resultados da seção anterior em que a constante de defasamento apresenta variações mais significativas quando considerada a formulação proposta em (3), para ambos os tipos de solo (mais e menos condutivo).

4.2 Impedância impulsiva

Em grande parte das situações é de interesse, principalmente prático, o conhecimento das condições críticas que podem ser determinadas e quantificadas a partir dos valores de pico de tensão desenvolvidos no aterramento. Nesses casos, é comum aproximar a impedância de aterramento pela impedância de aterramento impulsiva (Z_p).

A partir da quantificação da impedância impulsiva, a máxima elevação de potencial no ponto de injeção pode ser prontamente estimada por meio da multiplicação de Z_p pelo valor de pico da corrente injetada. Tal possibilidade é bastante adequada e atrativa do ponto de vista aplicado na avaliação e determinação de práticas imediatas de proteção contra descargas atmosféricas. Além disso, se estimado o valor de impedância de surto da torre de transmissão, pode-se quantificar o valor do coeficiente de reflexão no ponto de conexão torre-aterramento e, em uma análise mais simplificada, determinar os valores de sobretensão na cadeia de isoladores.

A Tabela 1 apresenta os valores de impedância impulsiva para os três modelos de solo e as diferenças percentuais entre os valores obtidos para o modelo Solo 1 e aqueles que consideram a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Em ambos os modelos de solo que incluem essa variação observa-se uma redução

significativa da impedância impulsiva. Em solos mais condutivos em baixa frequência, observa-se uma maior redução para o modelo Solo 2. Em solos com resistividade mais elevada em baixa frequência, o modelo Solo 3 apresenta redução sensível ultrapassando o valor de 200% em relação ao modelo Solo 1.

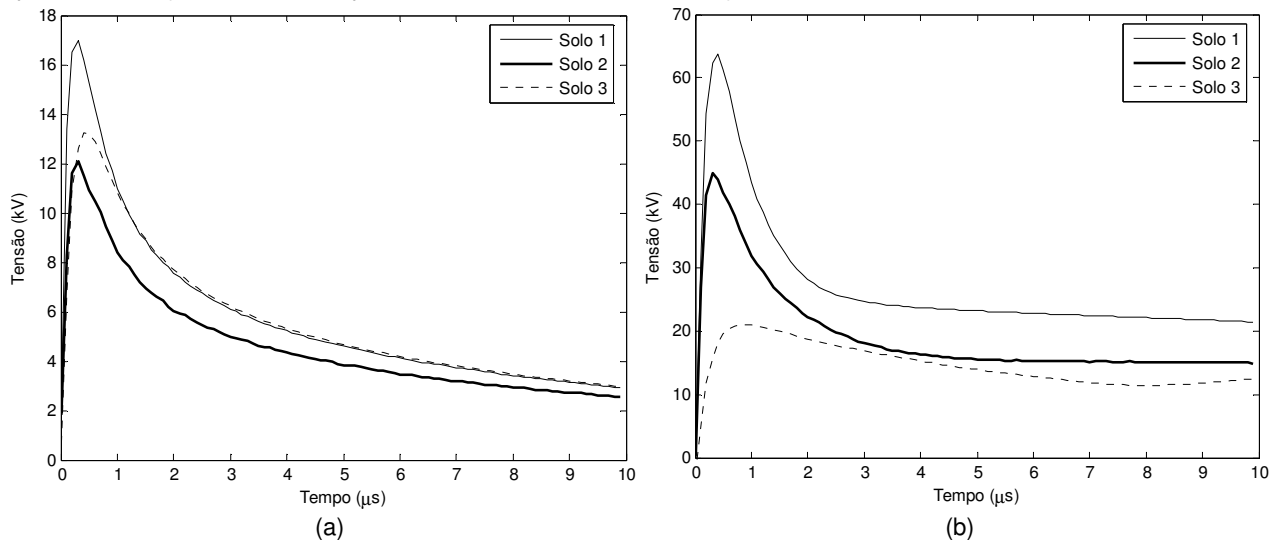


FIGURA 7 – Tensões resultantes da injeção de uma onda de corrente de 1,2/50 μ s em um eletrodo horizontal inserido em um solo de condutividade: (a) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 100\Omega.m$, e (b) $1/\sigma_0 = \rho_{100\text{Hz}} = 1000\Omega.m$

Tabela 1 – Impedância de aterramento impulsiva

	Impedância impulsiva (Ω)		Diferença percentual (%)	
	1/100	1/1000	1/100	1/1000
σ_0 (S/m)	1/100	1/1000	1/100	1/1000
Solo 1	16,95	63,77	-	-
Solo 2	12,08	44,86	-40,31	-42,15
Solo 3	13,22	21,02	-28,21	-203,38

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma avaliação dos efeitos da variação com a frequência dos parâmetros do solo, condutividade e permissividade elétrica, no comportamento transitório do aterramento quando solicitado por correntes impulsivas. Mostrou-se que a inclusão da variação dos parâmetros altera a propagação dos campos eletromagnéticos guiados pelo eletrodo de aterramento. Verificou-se, ainda, por meio de dois conjuntos de resultados (tensão transitória e impedância impulsiva), que, definitivamente, a inclusão da referida variação dos parâmetros com a frequência altera os cálculos e análises do aterramento. Foi observada uma expressiva redução nos valores de pico de tensão desenvolvidos no ponto de injeção e de impedância impulsiva, quando são considerados modelos de solo que contemplam a variação da condutividade e permissividade elétricas do solo ao longo do espectro. Foram observadas, também, diferenças entre os resultados obtidos a partir de metodologias distintas de quantificação dos parâmetros do solo em função da frequência, o que mostra que pesquisas adicionais devem ser realizadas neste campo.

Os resultados obtidos neste trabalho levaram os autores a refletir sobre diversos aspectos associados a aterramentos elétricos e solicitações oriundas de descargas atmosféricas. Dentre os já destacados no parágrafo anterior, dois outros merecem ser salientados. Primeiro, a partir dos resultados apresentados, ficou clara a importância fundamental de, na análise de aterramentos solicitados por correntes impulsivas, se considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência. A não inclusão dessa variação conduz a resultados conservativos, todavia irreais. Ao se trabalhar com valores irreais de, por exemplo, impedância impulsiva, perde-se a referência de análise do sistema elétrico e o engenheiro é conduzido a erros em cascata como a estimativa de falsos valores de sobretensão na cadeia de isoladores, gastos adicionais e desnecessários com eletrodos de aterramento e, sobretudo, estabelecimento de técnicas inadequadas de proteção contra descargas. Segundo, os resultados obtidos mostram uma redução significativa da impedância impulsiva quando incluída a dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Tal redução incita os autores a questionarem, portanto, se são realmente os sistemas de aterramento os grandes “vilões” do sistema elétrico quando da ocorrência de desligamentos oriundos da incidência de raios. Aparentemente, os aterramentos apresentam desempenho melhor que o esperado e, na maioria das vezes, divulgado. Nesse sentido convém investigar com maior rigor outros elementos do sistema elétrico que possam influenciar o desempenho do sistema elétrico frente a descargas atmosféricas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, New York: IEEE, 2000, (IEEE Std. 80-2000).
- (2) VISACRO, F. S., PORTELA, C. M., Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric Power systems, Proceedings of Sym, High Voltage Engineering, Braunschweig, Alemanha, 1987.
- (3) PORTELA, C. M., Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 1004-1009, Seattle, EUA, 1999.
- (4) PORTELA, C.M., Frequency and transient behavior of grounding systems; I Physical and methodological aspects, Proceedings of the IEEE International symposium on electromagnetic compatibility, pp. 379-384, Austin, United States of America, 1997.
- (5) PORTELA, C.M., Frequency and transient behavior of grounding systems; II Practical Application Examples, Proceedings of the IEEE International symposium on electromagnetic compatibility, pp. 379-384, Austin, United States of America, 1997.
- (6) SOARES JUNIOR, A., VISACRO FILHO, S., HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems, IEEE Transactions on power delivery, vol. 20, nº 2, pp. 1206-1208, abril de 2005.
- (7) ALÍPIO, R. S., Modelagem Eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPGMMC/CEFET-MG), dezembro de 2008.
- (8) ALÍPIO, R. S., OLIVEIRA, M. L. F., SCHROEDER, M. A. O. et al., Aplicação do Método dos Momentos para avaliação do acoplamento eletromagnético entre eletrodos de aterramento: análise no domínio da frequência, Anais 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, Natal, Brasil, novembro 2008.
- (9) ALÍPIO, R. S., OLIVEIRA, M. L. F., SCHROEDER, M. A. O. et al., Análise do desempenho de aterramentos típicos de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: utilização da transformada de Fourier e do Método dos Momentos, Anais 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, Natal, Brasil, novembro 2008.
- (10) ALÍPIO, R. S., SCHROEDER, M. A. O., AFONSO, M. M. et al., A discussion of circuit equivalents of a vertical ground rod, Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing and 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects (GROUND' 2008 and 3rd LPE), Florianópolis, Brasil, novembro de 2008.
- (11) ALÍPIO, R. S., SCHROEDER, M. A. O., AFONSO, M. M. et al., Electromagnetic fields of buried conductors, Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing and 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects (GROUND' 2008 and 3rd LPE), Florianópolis, Brasil, novembro de 2008.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Rafael Silva Alípio: possui Graduação em Engenharia Industrial Elétrica e Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Atualmente, é professor contratado do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) do CEFET-MG. Tem interesse de pesquisa, principalmente, na área de Eletromagnetismo Aplicado a Estudos Transitórios em Aterramentos Elétricos.

Adriana Generoso Pedrosa: possui Graduação em Engenharia Industrial Elétrica pelo CEFET-MG. Atualmente, desenvolve seu trabalho de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL), associação ampla entre CEFET-MG e Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Suas pesquisas incluem, principalmente, medição da variação dos parâmetros eletromagnéticos de solos típicos com a frequência e sua influência no desempenho de sistemas de aterramento.

Marco Aurélio de Oliveria Schroeder: possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP) e Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É professor adjunto do DEE do CEFET-MG e trabalha nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos e Descargas Atmosféricas.

Roberta Kellem de Oliveira: É aluna do 4º período do Curso de Engenharia Elétrica (CEE) do CEFET-MG e desenvolve atividade de Iniciação Científica na área de medição da variação dos parâmetros eletromagnéticos de solos típicos com a frequência.