



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS - GDS

RESPOSTA TRANSITÓRIA DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO: UMA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA DEPENDÊNCIA COM A FREQUÊNCIA DA RESISTIVIDADE E DA PERMISSIVIDADE ELÉTRICAS DO SOLO

Silvério Visacro(*) Rafael Alípio

**Universidade Federal de Minas Gerais
LRC – LIGHTNING RESEARCH CENTER (UFMG/CEMIG)**

RESUMO

Uma metodologia inovadora para medição da variação dos parâmetros resistividade e permissividade do solo em campo, na faixa de frequências representativas de Descargas Atmosféricas é proposta e aplicada a determinado solo. Avalia-se a resposta a correntes impulsivas de eletrodo horizontal enterrado neste mesmo solo. Os resultados de elevação de potencial medida e simulada, incluindo a dependência com a frequência dos dois parâmetros, praticamente coincidem. Já os resultados de simulação assumindo-se a usual consideração de valores constantes para resistividade e permissividade apresentam erros da ordem de 50% a 100%, consoante a forma e o tempo de frente da onda de corrente.

PALAVRAS-CHAVE

Comportamento de aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas, Dependência com a frequência dos parâmetros do solo, Efeito da dependência com a frequência dos parâmetros do solo na resposta transitória de aterramentos

1.0 - INTRODUÇÃO

Na avaliação teórica do comportamento transitório de aterramentos elétricos, em estudos associados à proteção contra descargas atmosféricas, o valor adotado para a resistividade do solo é usualmente aquele obtido com instrumentos comerciais, que aplicam sinais de baixa frequência (~100 Hz) (1). Assume-se que a permissividade relativa do solo varia entre 4 e 81, de acordo com a umidade do solo (1).

Apesar da permeabilidade magnética da maioria dos solos ser basicamente igual a do vácuo, a resistividade e a permissividade elétricas variam de forma significativa na faixa de frequências representativas das descargas atmosféricas. Resultados experimentais apresentados, por exemplo, por Visacro & Portela (2) e Portela (3), ilustram tal variação. Apesar disso, esse efeito é geralmente ignorado nos cálculos da resposta transitória do aterramento, conforme destacado por Alípio e outros em (4).

Recentemente, com base na análise de resultados experimentais de elevação de potencial em resposta a injeção de correntes impulsivas em alguns arranjos simples de eletrodos de aterramento, os autores deste trabalho abordaram esta questão, considerando a diferença entre as formas de ondas da elevação de potencial medida e simulada (5). Verificou-se que a adoção de parâmetros do solo constantes na frequência (hipóteses indicadas acima) resulta em valores da impedância impulsiva de aterramento da ordem de 30% a 50% superiores aos medidos, em alguns casos (5).

O objetivo deste trabalho é apresentar novos resultados desenvolvidos pelos autores relativos ao tema, incluindo a proposta e a aplicação de uma nova metodologia de medição para determinação da variação com a frequência dos

(*)LRC - Lightning Research Center – UFMG - Av. Antônio Carlos 6627 - Pampulha – CEP: 31270-901
Belo Horizonte - MG - Brasil. Tel: (+55 31) 3409-4872
Email: Lrc@cpdee.ufmg.br

parâmetros resistividade e permissividade elétricas do solo em condições de campo. A partir dos resultados obtidos para determinado solo, avalia-se o efeito dessa dependência na resposta de um eletrodo horizontal enterrado neste mesmo solo, submetido a ondas de corrente impulsivas. O conteúdo deste artigo é derivado basicamente de três artigos dos autores (5), (6) e (7).

2.0 - DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção apresenta-se a metodologia de medição desenvolvida, incluindo o arranjo experimental para sua aplicação em campo e alguns resultados preliminares de medição.

2.1 Metodologia Proposta e Arranjo Experimental

O princípio básico da técnica proposta para medição da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência consiste na injeção de uma corrente impulsiva no solo através de uma cuba condutora de formato hemisférico, enterrada nesse solo, por meio da montagem ilustrada de forma esquemática na Figura 1, conforme descrito em (7).

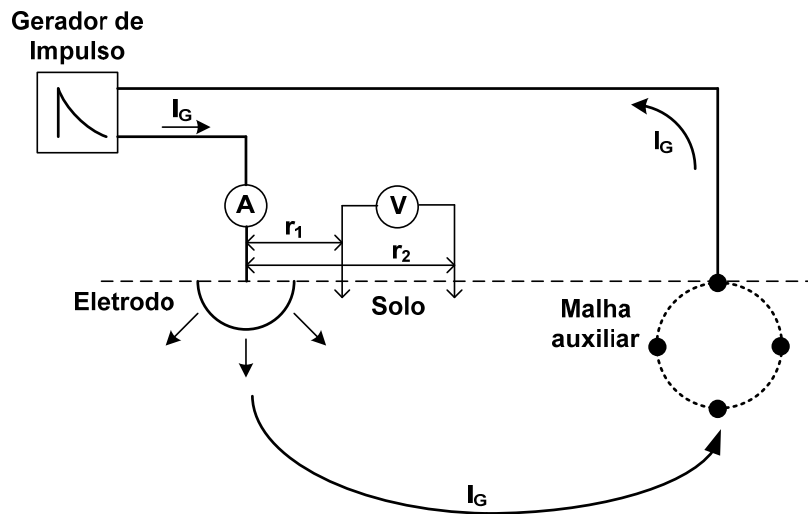


FIGURA 1 – Montagem implementada para medição em campo da variação dos parâmetros do solo com a frequência (7)

Estabelece-se uma tensão impulsiva entre a cuba hemisférica (raio ~23 cm) e a malha auxiliar (composta por 4 hastes de aproximadamente 70 cm), localizada a uma distância bem superior ao diâmetro do hemisfério. Isso resulta no fluxo de uma corrente impulsiva entre os eletrodos, medida por meio da queda de tensão em um resistor em série com o circuito de corrente. Essa corrente causa uma queda de tensão no solo, sendo que parte dela é detectada através de hastes de potencial fincadas no solo entre r_1 e r_2 (adota-se uma distância entre hastes de ~0,70 m). As medições de corrente e tensão descritas são realizadas simultaneamente por meio de um osciloscópio de dois canais ou, dependendo da topologia de medição, por meio de dois osciloscópios com disparo (trigger) comum.

Uma vez medidas a corrente e a queda de tensão no solo, computa-se a transformada de Fourier destes sinais, respectivamente $I(\omega)$ e $V(\omega)$. De posse dessas transformadas, calcula-se imediatamente a impedância harmônica de aterramento $Z(\omega)$, dada pela razão entre os componentes de frequência de tensão e corrente $Z(\omega) = V(\omega)/I(\omega)$, ao longo do espectro de frequências associado à onda de corrente injetada. Dada a configuração hemisférica, é razoável considerar que a corrente dispersa para o solo deste eletrodo é composta apenas por uma parcela de natureza condutiva e outra capacitiva, assim como a impedância $Z(\omega)$, e os parâmetros resistividade ρ e permissividade ϵ podem ser derivados diretamente da Equação (1) a seguir.

$$G + j\omega C = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{2\pi \left(\frac{1}{r_1} + j\omega\epsilon \right)}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \cdot \rho \quad (1)$$

2.2 Resultados Experimentais

Aplicou-se a metodologia descrita na Seção anterior para avaliação da dependência com a frequência de determinado solo. A corrente injetada (tempo de frente $\sim 0,2 \mu\text{s}$) e a queda de tensão resultante entre os pontos r_1 e r_2 , respectivamente 23 cm e 92 cm, estão ilustradas na Figura 2. Esta figura indica apenas uma janela de $10 \mu\text{s}$ dos sinais medidos, com duração da ordem de $500 \mu\text{s}$.

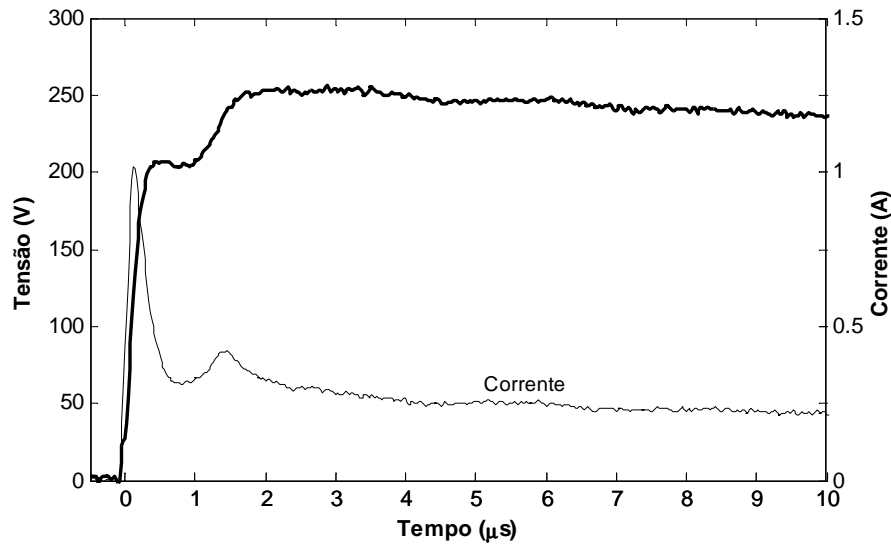


FIGURA 2 – Onda de corrente injetada e elevação de potencial resultante na cuba

A Figura 3 indica o módulo (a) e ângulo (b) da impedância $Z(\omega)$ associada à porção de solo delimitada por r_1 e r_2 , obtida a partir da razão entre tensão e corrente de cada componente obtida das transformadas de Fourier dos sinais medidos. A Figura 4 ilustra o comportamento da resistividade (a) e permissividade (b) elétricas, ao longo da faixa de frequências de 100 Hz a 4 MHz, resultado da aplicação da Equação (1).

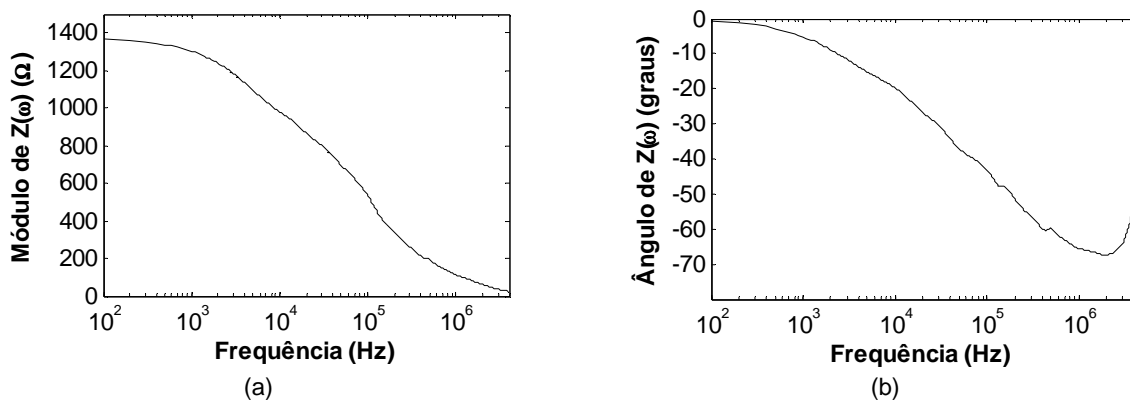


FIGURA 3 – Módulo (a) e ângulo (b) da impedância da porção de solo delimitada por $r_1=23$ cm e $r_2=92$ cm ao longo da faixa 100 Hz – 4 MHz.

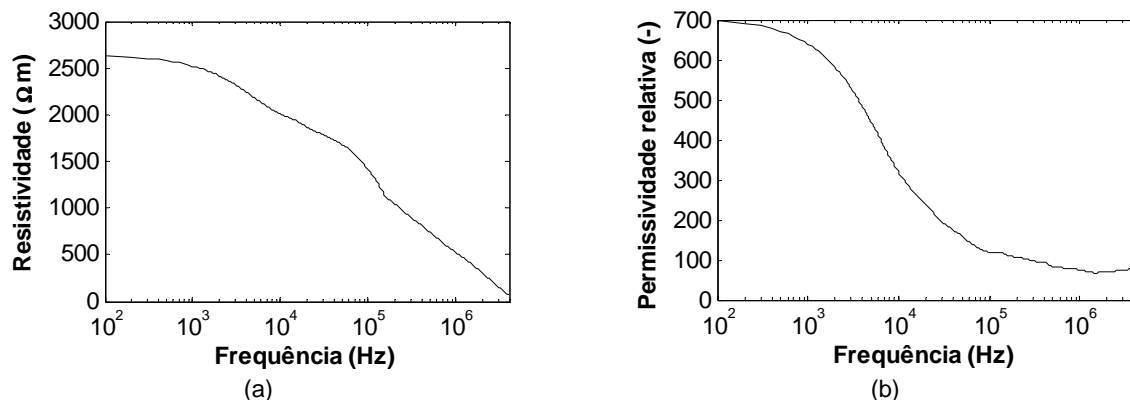


FIGURA 4 – Resistividade (a) e permissividade relativa (b) do solo ao longo da faixa 100 Hz – 4 MHz.

2.3 Discussão dos Resultados Experimentais

Um primeiro aspecto de relevo acerca dos resultados diz respeito à variação muito significativa de ρ e ϵ com a frequência ao longo do espectro avaliado. A Figura 4 indica uma redução dos valores de resistividade e permissividade em 100 Hz para cerca de 20% e 15%, respectivamente, em 1 MHz.

Deve-se salientar que a variação de r_2 entre 46 cm e 2 m indicou uma alteração das magnitudes de ρ e ϵ ao longo da faixa de frequências analisadas. No caso da resistividade, essa alteração é mais significativa, quando se comparam medições realizadas para pequenos valores de espaçamento (r_2) e tende a diminuir para o caso de pontos mais afastados. Contudo, observou-se que, de forma geral, a redução relativa de ρ em relação a seu valor em baixa frequência ρ_0 se manteve, independentemente do valor de r_2 . No caso da permissividade, para o solo analisado, a alteração dos valores de acordo com a variação r_2 é menos significativa, principalmente na faixa de frequências em que tal parâmetro apresenta papel importante no comportamento do aterramento (frequências superiores a ~10 kHz).

Das considerações anteriores, sugeriu-se a seguinte estratégia para definição da dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência. A variação de ρ pode ser estimada de seu valor medido em baixa frequência e pela aplicação de um fator de decrescimento estabelecido através da metodologia experimental proposta. Por outro lado, a sensibilidade pouco significativa de ϵ com relação à variação do espaçamento r_2 , permite que a dependência com a frequência desse parâmetro seja incluída tendo em conta diretamente os valores determinados experimentalmente.

Uma última observação de interesse prático merece ser mencionada. Ao longo do período em que as medições descritas nesta seção foram realizadas, foi detectada uma variação significativa no valor da resistividade em baixa frequência em decorrência do aumento da umidade do solo, associado às mudanças climáticas. Porém, o comportamento da permissividade e o decrescimento relativo da resistividade com a frequência não sofreram modificações muito significativas. Isso sugere que, em uma primeira aproximação, a dependência dos parâmetros do solo com a frequência pode ser considerada tendo em conta medições realizadas em um período diferente daquele em que o aterramento foi instalado.

3.0 - EFEITO DA DEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA NA RESPOSTA DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Com o objetivo de realizar uma primeira avaliação da relevância do efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência na resposta impulsiva de eletrodos de aterramento, foram desenvolvidas realizações experimentais adicionais.

Um eletrodo de 9,6 m foi enterrado a 0,5 m de profundidade no mesmo solo (e na mesma época) em que foram realizadas as medições apresentadas na Seção anterior. Para fins de avaliação da resposta transitória deste eletrodo, utilizou-se um gerador para aplicar tensões impulsivas entre ele e uma malha auxiliar, conforme montagem ilustrada na Figura 5. A corrente injetada no aterramento e a elevação de potencial resultante foram medidas com o auxílio de um osciloscópio de dois canais, sendo tomadas as devidas precauções para minimização do eventual acoplamento eletromagnético entre os cabos dos circuitos de medição de tensão e corrente.

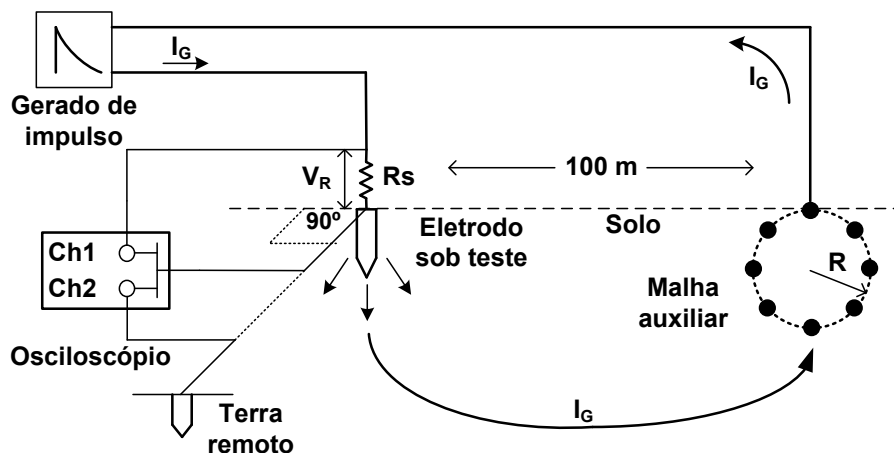


FIGURA 5 – Montagem para medição da elevação de potencial resultante da injeção de uma onda de corrente impulsiva em um eletrodo de 9,6 m enterrado em um solo de $\rho_0=1400 \Omega\text{m}$

A Figura 6 apresenta as duas ondas de corrente injetadas no eletrodo com tempos de frente, respectivamente, de 0,4 μs (a) e 1,4 μs (b). A elevação de potencial no aterramento referida ao infinito (GPR) resultante da injeção dessas ondas foi comparada com resultados de simulação utilizando-se o elaborado modelo HEM (Hybrid Electromagnetic Model) cujos detalhes e aplicações são apresentados em (8). Duas hipóteses foram contempladas nas simulações: i) consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes, sendo a resistividade igual ao valor medido em baixa frequência e a permissividade relativa igual a 20; e ii) consideração de parâmetros elétricos variáveis com a frequência, segundo medições apresentadas na Seção 2.2.

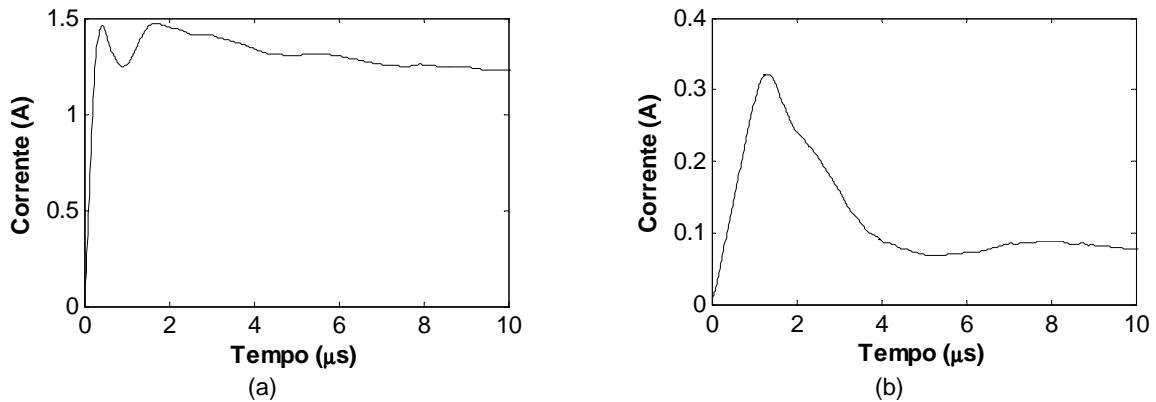


FIGURA 6 – Ondas de corrente injetadas nos eletrodos com tempos de frente de (a) 0,4 μs e (b) 1,4 μs .

A resistividade equivalente do solo em baixa frequência ρ_0 foi estimada da resistência de aterramento do eletrodo medida em baixa frequência, tendo sido obtido um valor igual a 1400 Ωm . A variação de ρ com a frequência foi definida pela aplicação de um fator relativo de decréscimo a ρ_0 , determinado a partir do gráfico da Figura 4(a) (Seção 2.2) e indicado na Figura 7(a). A variação de ϵ com a frequência foi estabelecida diretamente dos valores medidos indicados na Figura 4(b) (Seção 2.2), sendo tal variação detalhada na Figura 7(b).

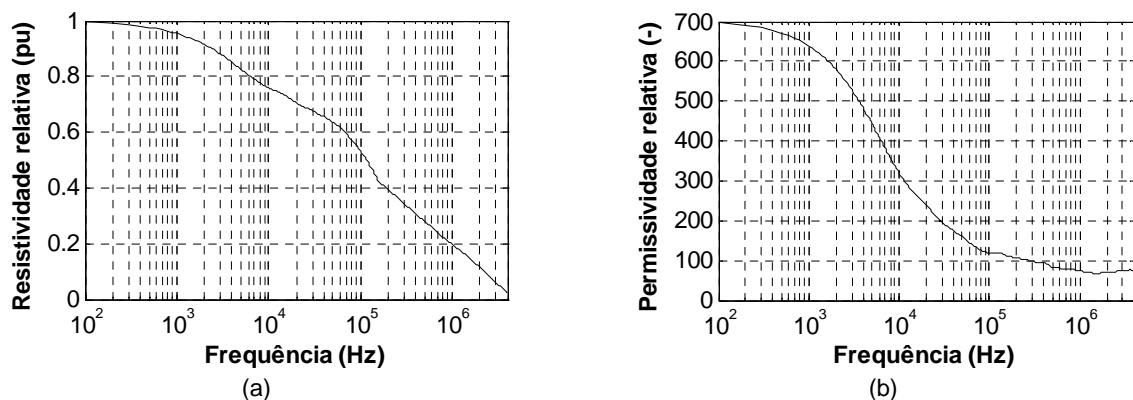
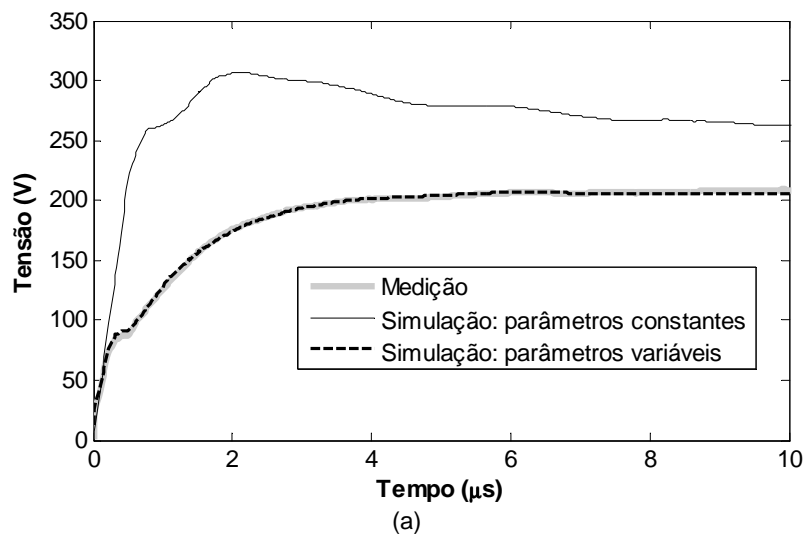


FIGURA 7 – Variação relativa da resistividade (a) e da permissividade (b) elétricas do solo ao longo da faixa 100 Hz – 4 MHz.



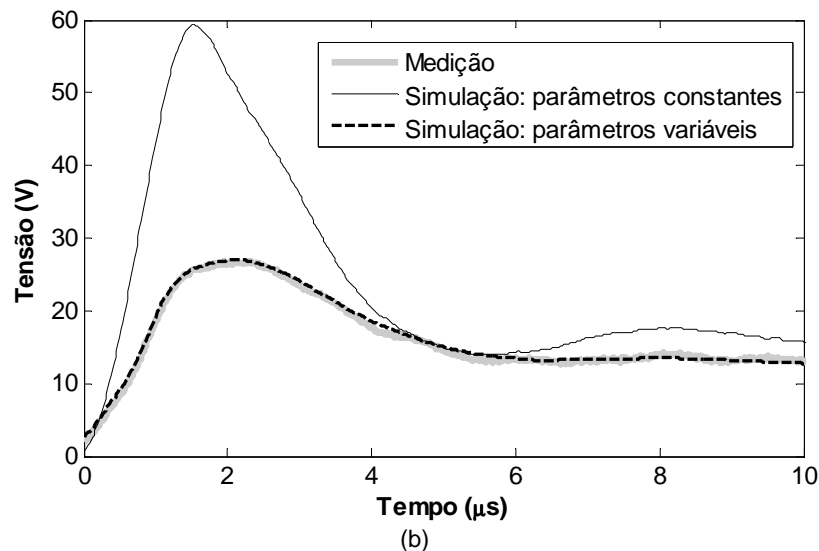


FIGURA 8 – Elevação de potencial medida e simulada em um eletrodo horizontal de 9,6 m, submetido à injeção de onda de corrente com tempo de frente de (a) 0,4 μ s e (b) 1,4 μ s

A Figura 8 compara as curvas de GPR medido e simulado, segundo as hipóteses de parâmetros constantes e variáveis e considerando as ondas de corrente de tempo de frente de 0,4 μ s (a) e 1,4 μ s (b).

Os resultados obtidos são muito significativos e denotam a relevância do efeito. A inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência, determinada pelo método proposto, basicamente promove a coincidência das curvas de GPR medida e simulada. Por outro lado, os resultados de simulação decorrentes da hipótese de parâmetros do solo constantes leva a GPRs muito superiores aos medidos: aproximadamente 50% e 110%, respectivamente para as ondas de corrente de tempo de frente 0,4 μ s e 1,4 μ s.

4.0 - CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho uma metodologia original e de implementação viável em condições práticas para determinação da dependência com a frequência dos parâmetros resistividade e permissividade do solo, em condições de campo. A aplicação da metodologia desenvolvida a um solo típico mostrou que a variação da resistividade e permissividade com a frequência, ao longo da faixa investigada (100 Hz a 4 MHz), que contempla o espectro de interesse na análise de transitórios oriundos de descargas atmosféricas, é bastante significativa.

A partir dos dados de medição da variação dos parâmetros do solo, definiu-se uma estratégia para cômputo dessa variação em simulações do comportamento transitório de eletrodos de aterramento. Essa estratégia foi aplicada na determinação da dependência com a frequência dos parâmetros de um solo de $\rho_0 = 1400 \Omega\text{m}$ e na avaliação da resposta de um eletrodo horizontal de 9,6 m, enterrado a 0,5 m de profundidade no mesmo solo, frente a ondas de corrente com tempos de frente típicos de descargas atmosféricas. A inclusão de parâmetros elétricos do solo variáveis com a frequência determinados a partir da metodologia proposta levou basicamente as ondas de GPR medida e simulada a se igualarem. Resultados similares foram obtidos para outros solos de baixa e alta resistividade, como comentado em (7).

Dada a excelente concordância observada entre as curvas medidas e simuladas, dois aspectos principais devem ser realçados.

Primeiro, a nova metodologia proposta para medição da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência é fisicamente consistente e está devidamente validada por meio da comparação com resultados experimentais, tendo em vista as aplicações de interesse neste trabalho.

Segundo, a notável concordância entre os resultados medidos e simulados denota a relevância de se considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência no estudo de transitórios em sistemas de aterramento e mostra que as diferenças observadas entre medições e simulações são realmente devidas à incorreta consideração dos parâmetros do solo resistividade e permissividade constantes.

Esta em curso uma avaliação para se verificar a viabilidade de se obter uma formulação geral para variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência a partir da aplicação sistemática da metodologia desenvolvida a diferentes solos em condições naturais de campo.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VISACRO, S., "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp.381–386, Jan. 2007.
- (2) VISACRO, S., and PORTELA, C. M., "Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems," in *Proc. of Sym. High Voltage Engineering*, Braunschweig, Germany, 1987.
- (3) PORTELA, C. M., "Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior," in *Proc. of IEEE Int. Sym. Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, 1999, pp. 1004–1009.
- (4) ALÍPIO, R., SCHROEDER, M. A.O., AFONSO, M. M., and OLIVEIRA, T. A. S., "The influence of the soil parameters dependence with frequency on impulse grounding behavior", in *Proc. of X International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA)*, Curitiba, Brazil, November 2009.
- (5) VISACRO, S., MURTA VALE, M. H., GUIMARÃES, M. B., ARAÚJO, R. A., PINTO, W. L. F., and ALÍPIO, R., "The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent resistivity and permittivity of soil", in *Proc. of 30th International Conference on Lightning Protection*, Cagliari, Italy, September 2010.
- (6) VISACRO, S., ALÍPIO, R., MURTA VALE, M. H., and DE ARAÚJO, L. S., "Recent findings in soil parameter frequency dependence and their influence on the lightning response of grounding electrodes", in *Proc. 2010 Int. Conf. Grounding Earthing (GROUND' 2010)*, Salvador, Brazil, November 2010.
- (7) VISACRO, S., ALÍPIO, R., MURTA VALE, M. H., PEREIRA, C., " The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: the Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, DOI: 10.1109/TEM.2011.2106790, 2011.
- (8) VISACRO S., SOARES A. JR, "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.20, No.2, pp. 1026-1208, April 2005.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Silvério Visacro nasceu em Belo Horizonte em 1956. Graduiu-se (1979) e obteve o mestrado (1983) em Eng. Elétrica pela UFMG e doutorou-se na COPPE/UFRJ (1992). É Professor Titular da UFMG na área de Eng. Elétrica em Eletromagnetismo Aplicado, com ênfase nas aplicações associadas às Descargas Atmosféricas e aos Aterramentos Elétricos. Em 2001, com o suporte da CEMIG constituiu o LRC - Lightning Research Center, avançado centro de pesquisa dos raios e seus efeitos, onde lidera equipe de 50 membros, dentre docentes, pós-doutorandos e alunos (doutorandos, mestrandos e de Iniciação Científica) na realização de pesquisas de alto nível. É autor de dois livros, respectivamente nos temas Aterramentos Elétricos e Descargas Atmosféricas, e de mais de 300 artigos (52 em periódicos). É um dos editores do Journal of Lightning Research e preside o GROUND & LPE: Intern. Conference on Grounding and Earthing & Lightning Physics and Effects. Atua no Comitê Científico de outros eventos internacionais da área: SICEL e SIPDA. Coordena a Rede Brasileira de Sobreensões Atmosféricas.