



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/18
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**ESTUDO NUMÉRICO - EXPERIMENTAL DE SURTOS PROVOCADOS POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM MALHAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO.**

Júlio Antônio Salheb do Nascimento*
Rodrigo Melo e Silva de Oliveira
Daiyuki Maia Fujiyoshi
Lorena de Fátima Pinheiro Carvalho
Ramon Cristian Fernandes Araújo
Manuel Joaquim da Silva Oliveira

ELETRONORTE
UFPA
UFPA
UFPA
UFPA
ELETRONORTE

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre os comportamentos transitório e estacionário de sistemas de aterramento quando submetidos a surtos com forma de onda de descargas atmosféricas. As análises dos sistemas de aterramento foram feitas por meio de dados obtidos através de experimentos realizados em campo e de simulações numéricas, utilizando o método FDTD. Nas simulações numéricas, o *setup* experimental (hastes, cabos, resistor e sinal injetado) e os parâmetros do solo e vácuo (condutividade, permissividade elétrica e permeabilidade magnética) foram modelados numericamente. Observou-se boa concordância entre os sinais medidos durante os testes experimentais e os seus respectivos sinais obtidos numericamente.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de aterramento, análise transitória, método FDTD e equações de Maxwell, experimentos em campo.

1.0 - INTRODUÇÃO

Normalmente, os sistemas de aterramento são projetados considerando-se apenas as características de regime permanente. Porém, o comportamento transitório dos sistemas de aterramento elétrico desempenha papel fundamental na resposta transitória do sistema elétrico frente às solicitações determinadas por diversos fenômenos de curta duração, sobretudo as descargas atmosféricas. Tais solicitações representam o principal fator responsável pela interrupção dos serviços das concessionárias de energia. No Brasil, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição são provocados por raios, seja por efeito direto causado pela circulação de altas correntes de surto pelos circuitos de alta ou baixa potência ou por efeitos indiretos, relacionados à indução de correntes em circuitos eletrônicos de controle devido à propagação de campos eletromagnéticos intensos, cuja fonte é a própria descarga atmosférica. Para minimizar o elevado número de desligamentos provocados por raios, diversas técnicas têm sido desenvolvidas, destacando-se entre elas o aperfeiçoamento dos sistemas de aterramento, de modo a minimizar a impedância de aterramento, e o uso de para-raios (1). Além dos danos causados aos sistemas elétricos e eletrônicos, as descargas elétricas podem ser responsáveis pela geração de

(*) Rod. Arthur Bernardes, n° 2175 CEP 66115-000 Cidade, Belém -PA, – Brasil
Tel: (+55 91) 32527568 – Fax: (+55 91) 3257-1966 – Email: juliosalheb@eln.gov.br

potenciais perigosos para os usuários do serviço e para pessoas que, por ventura, estejam presentes em regiões próximas às descargas (2).

Em um projeto conjunto da Eletrobrás/Eletronorte e a Universidade Federal do Pará (UFPA), fez-se um estudo do comportamento transitório e de regime permanente de alguns sistemas de aterramento por meio de simulações numéricas e por testes experimentais realizados em campo. A metodologia para realizar as medições de tensão e corrente baseia-se no trabalho experimental de Tanabe (3).

Para realizar as simulações numéricas que validam os experimentos realizados, utilizou-se o *software* SAGS (*Synthesis and Analysis of Grounding Systems*) (4) que resolve numericamente as equações de Maxwell através do método FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) (5) para um ambiente 3-D em conjunto com a técnica de truncagem do domínio computacional CPML (*Convolutional Perfectly Matched Layer*) (6). Além disso, o SAGS utiliza a formulação de fio-fino (7) para representar as hastes, cabos e os eletrodos utilizados nos experimentos. Ressalta-se que o *software* SAGS foi validado para diversas aplicações experimentais publicadas na literatura técnica, conforme pode ser observado em (4),(8) e (9).

Dessa forma, neste trabalho objetiva-se analisar experimentalmente e numericamente as respostas transitórias e DC de sistemas de aterramento simples. Além disso, objetiva-se explicitar detalhes raramente vistos na literatura, que são determinantes para se obter corretamente as respostas transitórias. Neste trabalho, as curvas transitórias obtidas experimentalmente são validadas através das simulações numéricas realizadas através do método FDTD.

2.0 - ASPECTOS DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

Os sistemas de aterramento elétrico são estruturas usualmente compostas por elementos metálicos enterrados e, em algumas situações, por outros materiais que são conectados a um sistema elétrico. As estruturas que compõem o sistema de aterramento podem ser apenas uma haste enterrada verticalmente ou uma complexa malha de aterramento, onde vários equipamentos são aterrados simultaneamente. A principal finalidade de um sistema de aterramento é proporcionar maior segurança às pessoas que estiverem nas proximidades da ocorrência da descarga (ou surto) e proteger os equipamentos, transferindo as correntes de surto para o solo da maneira mais eficiente possível. Além disso, o aterramento atua nos sistemas de modo a estabelecer referências de potencial ou como forma de criar um condutor de retorno pela terra (10).

Na literatura, os principais parâmetros utilizados para avaliar a eficiência dos sistemas de aterramento são a resistência de aterramento R , TGR (*Transient Grounding Resistance*), impedância impulsiva Z e coeficiente de impulso A (11), (12). A resistência de aterramento R é um parâmetro para avaliar o desempenho de regime permanente DC do aterramento. Já a impedância impulsiva Z e o coeficiente de impulso A são parâmetros utilizados para avaliar a performance transitória do sistema de aterramento. A TGR permite avaliar a eficiência da transferência da corrente para a terra tanto no período estacionário quanto no transitório. A TGR é definida por $TGR = v(t)/i(t)$, onde $v(t)$ é a função voltagem transitória obtida entre o ponto de injeção e o eletrodo remoto de voltagem e $i(t)$ é a função corrente transitória injetada (3). A resistência de aterramento é definida por $R = V/I$, onde V e I são obtidos no regime DC de $v(t)$ e $i(t)$, respectivamente. A impedância impulsiva é dada por $Z = V_m/I_m$, onde V_m e I_m são os valores de pico de $v(t)$ e $i(t)$, respectivamente (12). Já o coeficiente de impulso A é utilizado para avaliar a relação entre o desempenho transitório (ou impulsivo) e de regime permanente através da relação $A = Z/R$ (11).

Vale ressaltar que apenas os parâmetros DC são normalmente considerados para a avaliação da eficiência dos sistemas de aterramento. Porém, a análise do desempenho dos sistemas de aterramento para altas frequências é de fundamental importância, visto que as ocorrências mais graves ocorrem principalmente no período transitório, devido principalmente a descargas atmosféricas e surtos no sistema elétrico (11), (12), pois neste período a transferência de correntes para o solo tende a ser mais difícil devido às altas impedâncias do sistema eletrodo-terra.

3.0 - SETUP EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

O *setup* experimental empregado neste trabalho é semelhante ao da configuração apresentada por Tanabe em (3). Conforme é observado na Figura 1(a), os equipamentos utilizados neste trabalho foram: gerador de surto de voltagem, osciloscópio e inversor de energia, além de bateria, hastes de terra, cabos elétricos e uma ponte resistiva.

Neste trabalho, utilizou-se o osciloscópio digital Tektronix TPS 2024B (largura de banda 200 MHz e taxa de amostragem 2 GS/s), o qual possui quatro canais isolados entre si, ou seja, os referenciais de voltagem dos canais são independentes. Com isso, o acoplamento condutivo entre as referências dos canais foi eliminado e permitiu o

uso de mais de um canal simultaneamente. Vale ressaltar que o uso de mais de um canal concomitantemente elimina a possibilidade de erro de medição da defasagem entre os sinais $v(t)$ e $i(t)$ obtidos nos experimentos em campo, elevando a confiabilidade nas medições. Esta defasagem entre $v(t)$ e $i(t)$ ocorre naturalmente devido ao fato de a impedância do sistema de aterramento ser complexa. Para eliminar reflexões do pulso (surto) na rede elétrica e minimizar ruídos provenientes da mesma nas medições, uma bateria automotiva e um inversor de energia (1250 W, 12 V_{DC} – 110 V_{AC}) foram utilizados para alimentar os equipamentos de medição e o gerador de surto.

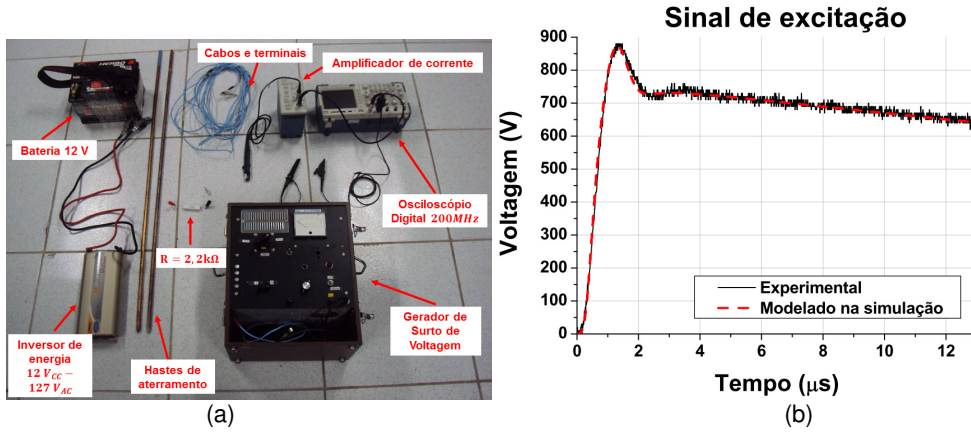


FIGURA 1: Equipamentos utilizados nas medições. (a) Imagem dos equipamentos, (b) Sinal do gerador (medido experimentalmente e função matemática usada para excitação nas simulações numéricas).

Para o desenvolvimento deste trabalho, fez-se necessária a construção de um gerador de surto, o qual atende às normas IEC 60060-1 (13) e *IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing* (14) para testes com pulsos de alta tensão que reproduzam as formas de onda das descargas atmosféricas. As normas (13) e (14) determinam que os tempos de subida e de cauda da tensão com os terminais em circuito aberto devem ser iguais a $0,8 \mu s$ e $50 \mu s$, respectivamente, para representar as descargas subsequentes. Esta situação é mais crítica do ponto de vista da performance de transferência de corrente para a terra devido ao pequeno tempo de subida do pulso. A forma de onda do gerador de surto produzido foi modelada matematicamente através da expressão

$$p(t) = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_{21}}} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^\alpha}{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^\alpha + 1} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_{22}}} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^\alpha}{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^\alpha + 1} + A_3 e^{-\left(\frac{t-t_0}{T}\right)^2} + K, \quad (1)$$

onde, $A_1 \approx 724,111 \text{ V}$, $A_2 \approx 52,472 \text{ V}$, $A_3 = 190 \text{ V}$, $\tau_{11} = 5,5 \times 10^{-7} \text{ s}$, $\tau_{12} = 2 \times 10^{-6} \text{ s}$, $\tau_{21} = 6,5 \times 10^{-5} \text{ s}$, $\tau_{22} = 2,3 \times 10^{-4} \text{ s}$, $\alpha = 3,5$, $t_0 = 1,25 \times 10^{-6} \text{ s}$, $T = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$ e $K \approx -0,367 \text{ V}$.

Na Figura 1(b), apresenta-se a comparação entre o sinal do gerador de surto utilizado nos testes experimentais e o sinal $p(t)$ usado para excitar a estrutura nas simulações numéricas. Observa-se a boa concordância entre estes dois sinais.

4.0 - ESTUDOS DE CASO - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Neste trabalho, os experimentos foram realizados em uma área arborizada, de aproximadamente $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, afastada de edificações e localizada no Centro de Tecnologia da Eletrobrás/Eletronorte no bairro de Miramar em Belém/PA. Neste local, o nível máximo de ruído medido foi de apenas 100 mV , contribuindo para que os sinais medidos durante os experimentos apresentassem excelente concordância com os sinais simulados. Os sistemas de aterramento analisados foram de uma haste, duas hastes conectadas e quatro hastes conectadas formando um sistema de aterramento de geometria retangular (Figuras 2-4). Conforme dito anteriormente, para analisar o comportamento transitório de sistemas de aterramento, os experimentos foram realizados com base na metodologia desenvolvida por Tanabe (3). Ressalta-se que o solo apresentou baixo teor de umidade durante o período dos testes experimentais.

Nesta Seção, inicialmente são apresentados os sistemas de aterramento analisados neste trabalho. A comparação entre os resultados experimentais e os numéricos é apresentada e discutida na Subseção 4.4.

4.1 Sistema de Aterramento Composto por uma Única Haste

O *setup* experimental do experimento utilizado para analisar a resposta transitória do sistema de aterramento composto por uma haste é apresentado na Figura 2(a). O pulso de voltagem foi aplicado entre a haste de injeção, enterrada verticalmente, e o resistor (ponte resistiva). A haste de injeção e os eletrodos remotos dos circuitos de tensão e corrente têm 1,2 m de comprimento (dos quais 0,9 m foi enterrado verticalmente) e 7,9 mm de raio. A resistência efetiva do resistor é de 2054 Ω , o que difere do valor nominal de 2200 Ω . O fato do valor efetivo da resistência ser significativamente diferente do valor nominal está relacionado às condições de temperatura e ao comportamento transitório do material usado para confeccioná-lo. O comprimento do cabo elétrico usado como linha de tensão é de 22 m e o cabo empregado como linha de corrente possui 10 m de comprimento (ambos têm 1,25 mm de raio e foram posicionados 10 cm acima da superfície do solo). Os pontos de medição da tensão induzida $v(t)$ e corrente injetada $i(t)$ estão indicados na Figura 2.

O experimento realizado em campo foi reproduzido no *software* SAGS, conforme Figura 2(b). A região de análise considerada foi de $300 \times 160 \times 60$ células cúbicas de Yee com arestas $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = 0,10$ m. Os parâmetros elétricos (condutividade e permissividade elétrica) do solo foram extraídos a partir dos sinais obtidos experimentalmente. Conforme foi visto na Seção 2, a resistência elétrica de aterramento $R \approx 48 \Omega$ foi obtida a partir da resposta DC da curva de TGR experimental (Figura 5(b)). Com o valor de resistência de aterramento, pode-se calcular a resistividade efetiva do solo a partir de fórmulas analíticas apresentadas na literatura. Para uma

haste, utilizou-se a fórmula de Sunde, que é dada por $\rho = 2\pi LR \left[\ln \left(\frac{2L}{d} \right) \right]^{-1}$, onde ρ é a resistividade ($\Omega \cdot m$), L

é o comprimento (m) do eletrodo (haste) de aterramento enterrado verticalmente, d é o diâmetro (m) do eletrodo de aterramento e R é a resistência de aterramento (Ω). Assim, a condutividade elétrica efetiva do solo foi calculada por $\sigma = \rho^{-1} \approx 0,0174$ S/m. Para estimar a permissividade elétrica do solo, é necessário analisar o problema partindo das equações de Maxwell. Tomando a equação de Ampère no domínio do tempo, tem-se

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t}. \quad (2)$$

Reescrevendo a equação (2) no domínio da frequência, temos

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E}. \quad (3)$$

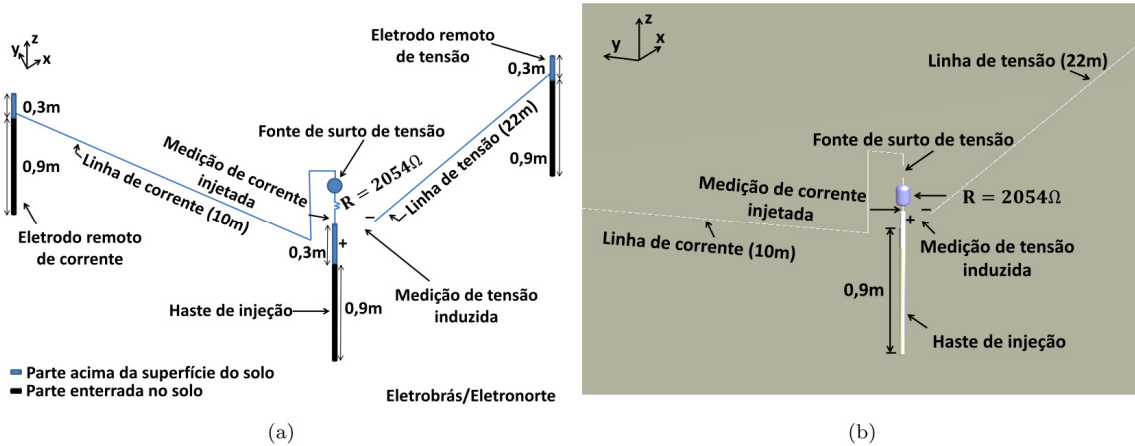


FIGURA 2: *Setup* experimental do sistema de aterramento composto por um única haste. (a) Imagem esquemática, (b) Representação no ambiente do *software* SAGS.

Na equação (3), observa-se que a condutividade elétrica efetiva σ é predominante para sinais de baixas frequências ($\omega_{\max} \epsilon \leq 10$), ou seja, verificou-se que o solo disponível para os testes experimentais possui alta condutividade elétrica. Deste modo, o valor de permissividade elétrica relativa não provocou influência significativa nos resultados das simulações para valores de tensão e corrente. Neste trabalho foi adotado $\epsilon_r = 50$, que está dentro da faixa usual de permissividade elétrica para este tipo de solo (15).

4.2 Sistema de Aterramento Composto por Duas Hastes Paralelas Eletricamente Conectadas

O sistema de aterramento discutido nesta Seção é composto por duas hastes paralelas de 1,2 m de comprimento e enterradas 0,9 m verticalmente. O *setup* experimental é idêntico ao discutido na Seção 4.1, exceto por uma segunda haste que está, em relação a haste de injeção, distante 0,9 m da haste de injeção e disposta paralelamente. Estas duas hastes estão eletricamente conectadas por um cabo elétrico, conforme pode ser observado na Figura 3. Na Figura 3(b), apresenta-se o detalhe da configuração geométrica do experimento reproduzido no ambiente computacional SAGS. Considerou-se que os parâmetros eletromagnéticos do solo são iguais ao caso do sistema de aterramento de uma haste, visto que os experimentos foram realizados no mesmo dia.

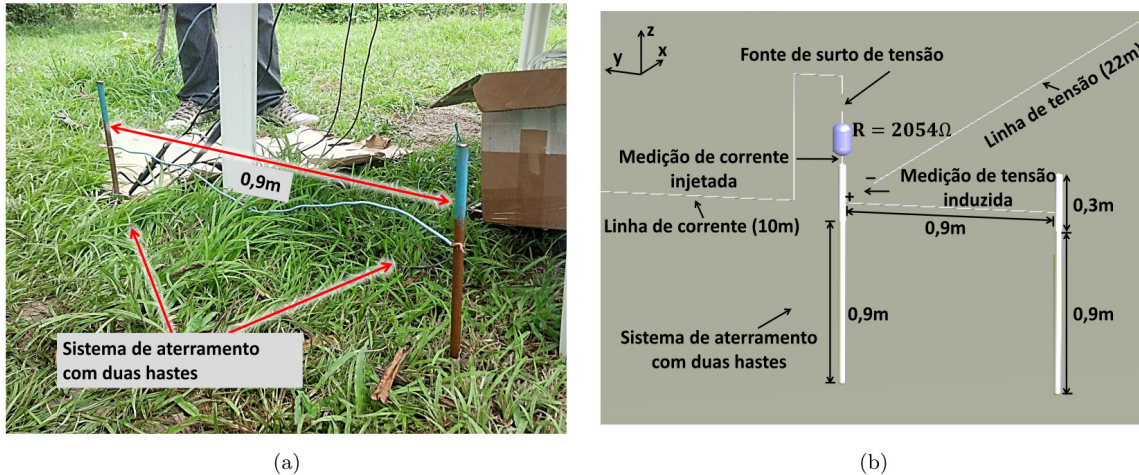


FIGURA 3: *Setup* experimental do sistema de aterramento composto por duas hastes. (a) Detalhe das duas hastes, (b) Representação no ambiente do *software* SAGS.

4.3 Sistema de Aterramento com Geometria Retangular Composto por Quatro Hastes Paralelas

O sistema de aterramento com geometria retangular apresenta o *setup* experimental semelhante aos demais casos discutidos acima, exceto pelo conjunto de quatro hastes enterradas verticalmente e eletricamente conectadas formando uma geometria retangular. Neste sistema, as quatro hastes possuem 1,2 m de comprimento, sendo que 0,9 m foram enterrados no solo. Estas hastes foram distanciadas 0,9 m entre si, conforme Figura 4. A representação do modelo numérico deste caso está ilustrado na Figura 4(b).

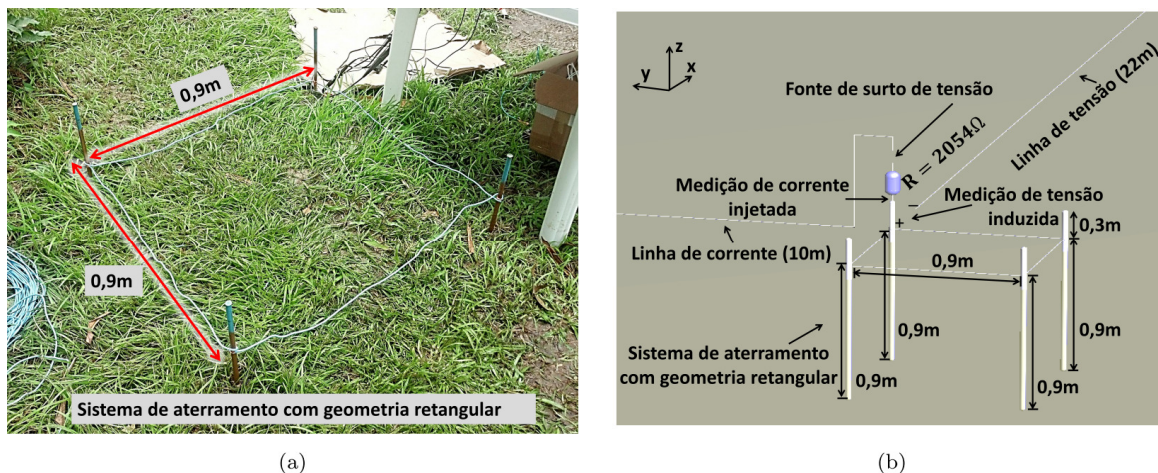


FIGURA 4: *Setup* experimental do sistema de aterramento com geometria retangular composto por quatro hastes paralelas. (a) Detalhe da geometria retangular formada pelas quatro hastes paralelas, (b) Representação no ambiente do *software* SAGS.

4.4 Resultados

Na Figura 5, observa-se excelente concordância entre as curvas transitórias de voltagem induzida $v(t)$ e corrente injetada $i(t)$ obtidas nos testes experimentais e simulações numéricas para todos os casos. Observou-se que os sinais de corrente medidos e simulados são praticamente iguais, indicando que o gerador de surto provê a corrente impulsiva solicitada por todas as cargas impostas pelos problemas analisados. Isto é garantido pela ponte resistiva

de 2054Ω . O pico do sinal de corrente medido foi $I_{p,exp} \approx 0,3913 \text{ A}$ e o pico do sinal de corrente simulado foi $I_{p,simu} \approx 0,40942 \text{ A}$. Assim, simulação e experimento apresentaram desvio máximo de aproximadamente 4,4% para a corrente.

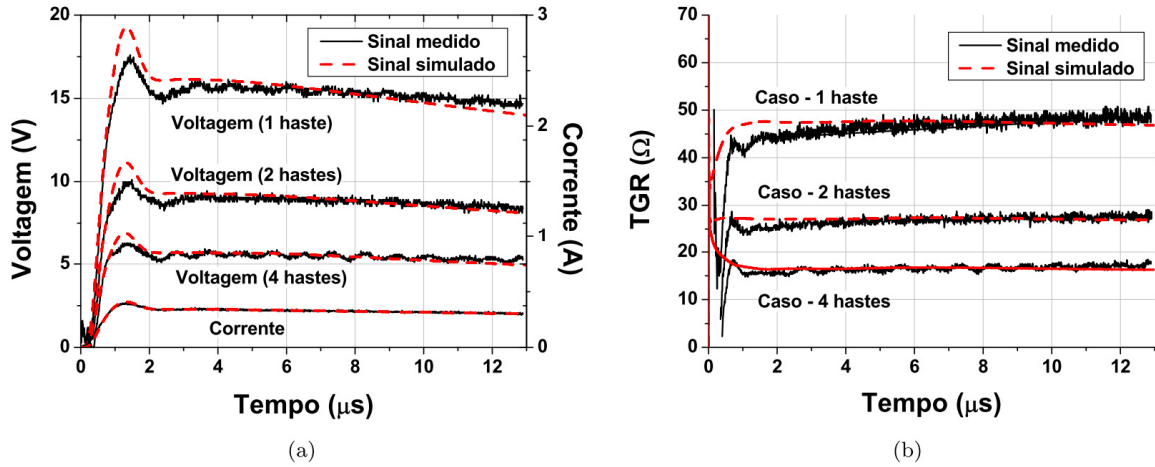


FIGURA 5: Sinais medidos em campo e obtidos por simulação numérica. (a) Sinais de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ transitórias, (b) Curvas de TGR.

A partir da Figura 5(a), observa-se que, para o caso de uma haste, o pico do sinal de tensão medido foi $V_{p,exp} \approx 17,3366 \text{ V}$ e o respectivo valor para o caso simulado foi $V_{p,simu} \approx 19,2719 \text{ V}$. Portanto, o desvio apresentado foi de aproximadamente 10,0%. Para o caso de duas hastes, o pico do sinal de tensão medido foi $V_{p,exp} \approx 9,96704 \text{ V}$ e o respectivo valor para o caso simulado é $V_{p,simu} \approx 11,1375 \text{ V}$. Dessa forma, o desvio apresentado é de aproximadamente 10,5%. Considerando-se o caso de geometria retangular (quatro hastes), temos $V_{p,exp} \approx 6,19648 \text{ V}$ e $V_{p,exp} \approx 6,8478 \text{ V}$, gerando um desvio máximo de aproximadamente 9,5%. Estes desvios entre os picos simulados e experimentais se justificam pela dispersão causada pela água presente no solo. Tal efeito não foi considerado na modelagem numérica.

Observando as curvas de TGR na Figura 5(b), observa-se que os valores de resistência de terra (valores DC da TGR) são de aproximadamente $46,850 \Omega$, $26,899 \Omega$ e $16,293 \Omega$ para uma haste, duas hastes e quatro hastes, respectivamente. A partir disso, infere-se que a resistência de terra de duas hastes é 42,585 % menor quando comparada à resistência de terra para uma haste. A resistência de terra de quatro hastes é 65,223 % menor do que a resistência de uma única haste. Além disso, foram obtidos os seguintes respectivos valores para o coeficiente de impulso: 1,0128, 1,0098 e 1,0199. Dessa forma, observa-se que o sistema de aterramento com quatro hastes apresenta a menor resistência de aterramento. Porém, o sistema com duas hastes paralelas apresenta o menor coeficiente de impulso, ou seja, a menor relação entre a impedância impulsiva Z e R .

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram feitas comparações entre a respostas transitória e de regime permanente obtidas por medições realizadas durante testes experimentais e dados obtidos via simulações numéricas. Os experimentos foram realizados em um terreno afastado, no qual o nível de ruído medido foi de aproximadamente 100 mV, proporcionando, assim, maior confiabilidade nas medidas realizadas, que concordam com os resultados numéricos.

A metodologia de medição empregada e o *setup* experimental foram baseados no trabalho de Tanabe. Porém, deve-se notar que: 1) como o gerador de surto possui uma baixa resistência de saída (de aproximadamente $R_o = 33 \Omega$), é necessário utilizar uma ponte resistiva $R_r \gg R_o$ para garantir que a tensão produzida pelo gerador seja transferida para a carga (sistema de aterramento), preservando sua forma de onda e amplitude; 2) a avaliação da resistência efetiva R_r da ponte resistiva é um fator determinante para haver concordância entre experimentos e simulações. O valor efetivo de R_r foi obtido dividindo-se a tensão transitória medida entre os terminais do resistor e a corrente que flui através dele; 3) deve-se minimizar o acoplamento entre o *setup* experimental e a rede elétrica: para isto, utilizou-se uma bateria de 12 V e um inversor para alimentar os instrumentos usados na medição

(osciloscópio e gerador de surto); 4) os canais do osciloscópio devem ser completamente independentes eletricamente (referências isoladas); 5) o gerador deve ser posicionado a, ao menos, 1,5 metro do ponto de injeção, onde as medidas transitórias são feitas, para reduzir induções vindas de correntes que fluem pelo circuito interno do gerador, que não são consideradas no modelo numérico.

Dessa forma, as simulações numéricas representam adequadamente os experimentos realizados em campo, desde que o *setup* experimental e os parâmetros eletromagnéticos do solo sejam representados corretamente no modelo numérico. Além disso, as cinco condições experimentais descritas acima devem ser atendidas. Com isso, verificou-se boa concordância entre os sinais obtidos pelas simulações numéricas e os sinais medidos.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

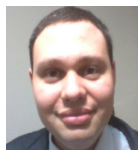
- (1) PINTO, O., NACCARATO, K.P., PINTO, I.R.C.A. The new Brazilian lightning detection network: First results. *in* 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), pp. 152–153, 2011.
- (2) TELLÓ, M. *Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequência*. EDIPUCRS, 2007.
- (3) TANABE, K. Novel method for analyzing the transient behavior of grounding systems based on the finite-difference time-domain method. *in* CRIEPI Report - Tokio, 2001.
- (4) DE OLIVEIRA, R.M.S. *Nova Metodologia para Análise e Síntese de Sistemas de Aterramento Complexos Utilizando o Método LN-FDTD, Computação Paralela Automática e Redes Neurais Artificiais*. Doutorado em engenharia elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de Tecnologia (ITEC), Universidade Federal do Pará (UFPA), 2008.
- (5) YEE, K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 14:302-307, 1966.
- (6) RODEN, J.A., GEDNEY, S.D. "Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, pp. 334–339, 2000.
- (7) TANIGUCHI, N.N.Y., BABA, Y., AMETANI, A. "An Improved Thin Wire Representation for FDTD Computations," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 56, No.10, 2008.
- (8) FILHO, R. H. T. C., DE OLIVEIRA, R. M. S., SOBRINHO, C., ALMEIDA, A. M. "Parallel-FDTD and experimental results of SAR for flat and head phantoms 900MHz," *in* Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International, pp. 373–378, Nov. 2009.
- (9) DE OLIVEIRA, R. M. S., MODESTO, J. F. M., MAIA, M. R. V., FUJIYOSHI, D. M., RAIZER, A. "Impulse coefficient for square grounding grids in low resistivity soils: Influence of injection electrode," *Journal of Electrostatics*, vol. 72, no. 5, pp. 372 – 380, 2014.
- (10) VISACRO FILHO, S. *Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação e filosofias de aterramento*. Artliber, 1ª edition, 2002.
- (11) GUPTA, B., THAPAR, B. "Impulse impedance of grounding grids," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 22, pp. 745–762, 1968.
- (12) GRCEV, L. "Impulse efficiency of ground electrodes," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 441–451, Jan. 2009.
- (13) I. S. I. 60060-1, *High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*, 1989.
- (14) IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. *IEEE Std 4-1995*, pp.1-135, 1995.
- (15) TAGG, G.S. *Earth resistances*. George Newsnes Ltd., London, 1964.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



JÚLIO ANTÔNIO SALHEB DO NASCIMENTO nasceu em Belém-Pará, Brasil, em 1973. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (1998), especialização em Qualidade e Eficiência Energética pela Universidade Federal do Pará (2004), Está realizando o curso de

Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará, Trabalhou Como Engenheiro das Centrais Elétricas do Pará S/A (2000 a 2003) como Engenheiro do Grupo Técnico de Energia da Agência Estadual de Regulação e Controle de Serviços Públicos do estado do Pará (2003-2007), e atualmente é Engenheiro de Manutenção Elétrica da Eletronorte desde 2007.



RODRIGO MELO E SILVA DE OLIVEIRA nasceu em Brasília-DF em abril de 1980. Possui graduação (Dez/2002), mestrado (Out/2004) e Doutorado (Fev/2008), títulos obtidos em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Telecomunicações, atuando principalmente nos seguintes tópicos: Métodos FDTD e RPIM, Processamento Paralelo Distribuído, Propagação, Espalhamento Eletromagnético, Aterramento Elétrico e antenas de Grafeno. Atualmente, faz parte do quadro de Professores da UFPA e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). É autor/co-autor de aproximadamente 90 publicações, dentre artigos em periódicos, capítulos de livro e conferências. É coordenador do Laboratório de Eletromagnetismo (LEMag/UFPA).

DAIYUKI MAIA FUJIYOSHI nasceu em Belém - Pará, Brasil, em 1991. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2014). Atualmente, cursa Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) na UFPA e é integrante do Laboratório de Eletromagnetismo (LEMag). Suas áreas de interesse são compatibilidade eletromagnética, análise numérica, sistemas de aterramento e análise de materiais dispersivos.

LORENA DE FÁTIMA PINHEIRO nasceu em Igarapé-Miri (Pará) em 1987. É graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2010). Atualmente é aluna de mestrado na mesma instituição e integrante do Laboratório de Eletromagnetismo (LEMag).

RAMON CRISTIAN FERNANDES ARAÚJO nasceu em Salvador-BA em 1991. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Estagiou, em 2013, na Eletrobrás Eletronorte, na área de Proteção de Sistemas Elétricos. Em seguida, cursou intercâmbio com duração de um ano na University of Notre Dame, Estados Unidos. Atualmente, cursa Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFPA, com ênfase em análise de sistemas de aterramento. Suas demais áreas de interesse são compatibilidade eletromagnética, sistemas radar e computação de alto desempenho.

MANUEL JOAQUIM DA SILVA OLIVEIRA nasceu em Braga, Portugal, em 1959. Atua como técnico de manutenção elétrica da Eletronorte desde 1979. Suas demais áreas de interesse são compatibilidade eletromagnética, qualidade de energia elétrica, sistemas de aterramento elétrico e termografia.