



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Aplicação de Função Base de Ordem Superior para Modelagem de Aterramentos Elétricos Utilizando o Método dos Momentos

NATÁLIA RODRIGUES DE MELO(1); MARCO AURÉLIO DE OLIVEIRA SCHROEDER(1); RODOLFO ANTÔNIO RIBEIRO DE MOURA(1); PATRÍCIA CAMPOS MARCELINO(1); UFSJ(1);

RESUMO

A determinação do comportamento transitório do sistema de aterramento solicitado por descargas atmosféricas é de fundamental importância para a investigação dos efeitos causados por este fenômeno. A representação dos sistemas de aterramentos pode ser feita por meio de modelos matemáticos fisicamente consistentes. O tempo computacional gasto nas simulações pode ser elevado dependendo da configuração do aterramento e da extensão dos eletrodos. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia de modelagem que permite reduzir o custo computacional das simulações sem comprometer a confiabilidade dos resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Resposta Transitória, Segmentação.

1.0 - INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico apresenta como principal função dispersar a corrente de falta para a terra, sem causar diferença de potencial (ou tensões induzidas) que possam causar danos a equipamentos ou comprometer a segurança de seres vivos (1), (2). Ademais, para fenômenos solicitantes de baixa frequência o comportamento dos eletrodos de aterramento é bem definido e os cálculos necessários para determinação da resposta do sistema são computacionalmente eficientes (2), (3). Entretanto, os eletrodos de aterramento apresentam um comportamento particular quando solicitados por fenômenos de alta frequência, como é o caso das correntes impulsivas associadas a descargas atmosféricas (4). Neste caso, a análise do sistema de aterramento torna-se mais complexa.

A abordagem da modelagem utilizada neste trabalho emprega um método numérico que tem como princípio a discretização do eletrodo em segmentos menores. Dependendo da configuração do sistema de aterramento e da extensão dos eletrodos, a duração das simulações pode ser de horas, se estendendo a dias. Tal fato está relacionado ao aumento do custo computacional para sistemas de aterramento mais complexos. É importante mencionar que o tempo requerido nas simulações é altamente influenciado pelas características do computador utilizado e da linguagem de programação implementada. A utilização de computadores mais eficientes e linguagens mais baixo nível (mais próxima à linguagem de máquina) contribui para a redução da duração das simulações.

Neste contexto, é mostrada a relevância do tema apresentado neste trabalho, que consiste em apresentar uma metodologia de modelagem que propõe a discretização do eletrodo de aterramento em segmentos maiores. O principal objetivo é reduzir o tempo computacional gasto nas simulações sem comprometer a confiabilidade dos resultados. A modelagem é utilizada para analisar o comportamento transitório de sistemas de aterramentos solicitados por descargas atmosféricas.

2.0 - MODELAGENS

2.1 Modelagem do sistema de aterramento

O modelo utilizado neste trabalho para representação do aterramento elétrico, submetido a injeção de correntes impulsivas, é denominado modelo eletromagnético híbrido (do inglês, HEM). A aplicação do HEM tem como objetivo determinar os principais parâmetros que caracterizam a resposta transitória do aterramento, de modo a conhecer o seu comportamento frente às solicitações típicas de descargas atmosféricas. Este modelo é desenvolvido no domínio da frequência, com base nas equações de Maxwell e a sua solução final é obtida por meio da teoria de circuitos (5). Estas características justificam o termo "híbrido" utilizado em sua nomenclatura.

A escolha do HEM está relacionada, principalmente, a dois critérios básicos: i) devido à facilidade de implementação do modelo, e ii) às inúmeras validações do HEM que já foram feitas por meio de comparações com resultados experimentais, inclusive para eletrodos horizontais (6-9), que corresponde ao tipo de configuração analisada neste trabalho. Os detalhes relacionados à implementação do HEM podem ser encontrados nos seguintes trabalhos: (10-13). As equações integrais obtidas pelo modelo HEM são resolvidas pela aplicação do Método dos Momentos (14), (15).

2.2 Modelagem do solo

O solo pode ser modelado por seus parâmetros eletromagnéticos: permeabilidade (μ), permissividade (ϵ) e resistividade (ρ). Várias medições de campo têm sido feitas a fim de verificar as principais características e tendências destes parâmetros no espectro de frequência típico de descargas atmosféricas (100 Hz até 4 MHz). Estudos indicam que a permeabilidade magnética do solo assume valor invariável e é considerada igual à permeabilidade do vácuo ($\mu \approx \mu_0$), diferente dos parâmetros elétricos do solo, resistividade e permissividade, que são fortemente dependentes da frequência (16-18).

Neste trabalho o solo é modelado com base nas seguintes condições:

- i) Parâmetros elétricos do solo variáveis com a frequência: a representação do solo é feita baseando-se no trabalho de Alípio e Visacro (19). As equações (1) e (2) são derivadas do modelo proposto em (19) e podem ser utilizadas para determinar a condutividade ($\sigma = 1/\rho$) e permissividade relativa do solo (ϵ_r), respectivamente.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 x h(\sigma_0) x \left(\frac{f}{1\text{MHz}} \right)^\gamma \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon'_\infty}{\epsilon_0} + \frac{\tan(\pi\gamma/2) x 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 (1\text{MHz})^\gamma} \sigma_0 x h(\sigma_0) f^{\gamma-1} \quad (2)$$

em que, σ_0 é a condutividade do solo em baixas frequências em mS/m ($\sigma_0 = 1/\rho_0$), ρ_0 é a resistividade do solo em baixas frequência em $\Omega.m$, ϵ_r é a permissividade relativa do solo e ϵ_0 é a permissividade do vácuo em F/m. Os parâmetros $h(\sigma_0) = 1,26 x \sigma_0^{-0,73}$, $\gamma = 0,54$ e $\epsilon'_\infty/\epsilon_0 = 12$ são definidos de modo a se obter resultados medianos para os parâmetros elétricos do solo.

- ii) Parâmetros elétricos do solo constantes com a frequência: neste caso, tem-se $\rho = \rho_0$ e $\epsilon_r = 10$.

2.3 Modelagem da corrente de descarga

Na literatura estão disponíveis várias metodologias para representação da forma de onda de correntes típicas de descargas atmosféricas, das quais se pode destacar o modelo proposto por Heidler (20). Por meio de funções de Heidler é possível representar as ondas de correntes impulsivas de maneira mais apropriada, i.e., este modelo é capaz de reproduzir características presentes em descargas reais, como a natureza côncava, observada na frente de onda das correntes, e a derivada máxima, localizada próxima ao primeiro pico da onda de corrente (21). Essas características estão presentes tanto nas primeiras descargas de retorno quanto nas subsequentes. A fonte de corrente pode ser representada pelas equações (3) e (4).

$$i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_{0k}}{\eta_k} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{1k}} \right)^{n_k}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{1k}} \right)^{n_k}} e^{-\frac{t}{\tau_{2k}}} \quad (3)$$

$$\eta_k = e^{-\left[\left(\frac{\tau_{1k}}{\tau_{2k}}\right)\left(\frac{n_k \tau_{1k}}{\tau_{2k}}\right)^{\frac{1}{n_k}}\right]} \quad (4)$$

em que, I_{0k} é a amplitude da onda de corrente em kA, τ_{1k} é a constante de tempo relacionada ao tempo de frente da onda em μs , τ_{2k} é a constante de tempo relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente em μs , η_k é o fator de correção da amplitude e n_k é o expoente que controla a inclinação da curva de corrente k . As informações utilizadas nesse artigo para reconstruir tais formas de onda foram retiradas de (21).

3.0 - ESTUDOS DE CASOS

A resposta do sistema de aterramento é determinada considerando as ondas de corrente mostradas na Figura 1, que reproduzem os parâmetros medianos das primeiras descargas de retorno ($I_P = 31 \text{ kA}$, $T_{d30} = 3,83 \mu\text{s}$)¹ e descargas subsequentes ($I_P = 12 \text{ kA}$, $T_{d30} = 0,67 \mu\text{s}$), mostradas na Figura 1 (a) e (b), respectivamente (21).

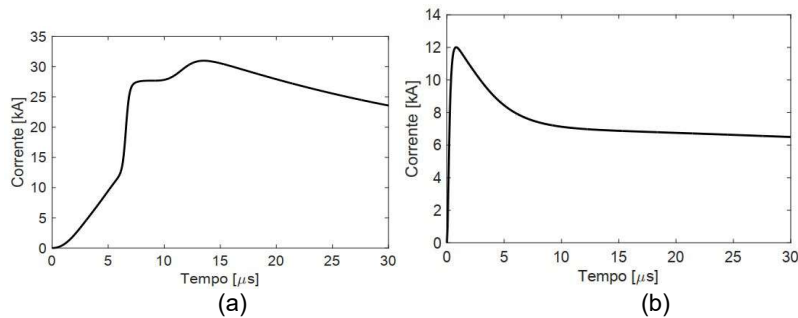


Figura 1 - Representação das ondas de corrente associadas às (a) primeiras descargas e (b) descargas subsequentes, devido à incidência de descargas atmosféricas registradas no Monte San Salvatore. Fonte: adaptado de (21).

A configuração geométrica analisada é composta por um eletrodo cilíndrico disposto horizontalmente no solo, conforme ilustrado na Figura 2. A definição do aterramento considerado é feita com base em dois aspectos. O primeiro é a maior disponibilidade de resultados experimentais na literatura, considerando apenas um eletrodo de aterramento, que possibilitam a validação da metodologia proposta. O segundo aspecto é que outros arranjos mais complexos podem ser obtidos como uma composição de eletrodos horizontais (22).

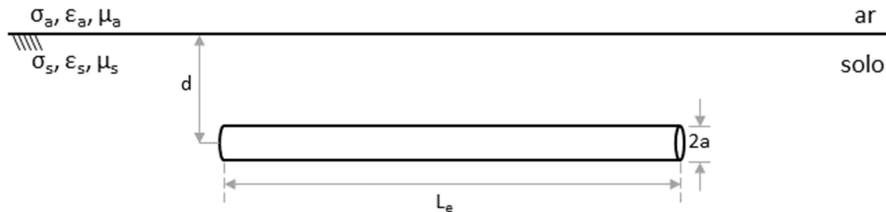


Figura 2 - Configuração do sistema de aterramento simulado.

As análises são realizadas a fim de determinar o comportamento transitório do eletrodo de aterramento frente à injeção de correntes características de descargas atmosféricas. O eletrodo possui raio a de 10 mm e está enterrado a uma profundidade d de 0,5 m. Os resultados são apresentados considerando os parâmetros elétricos do solo constantes e variáveis com a frequência. As investigações são feitas considerando diferentes valores de resistividade do solo medidas em baixa frequência, sendo $\rho_0 = 100 \Omega\cdot\text{m}$, $1.000 \Omega\cdot\text{m}$ e $10.000 \Omega\cdot\text{m}$. O comprimento L_e do eletrodo varia de acordo com a resistividade do solo e com o tipo de descarga considerada. Nas simulações utiliza-se o comprimento efetivo L_{ef} ² do eletrodo, mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de L_{ef} para cada caso considerado.

| $\rho_0 (\Omega\cdot\text{m})$ | $L_{ef} (\text{m})$ |
|--------------------------------|---------------------|
|--------------------------------|---------------------|

1 I_P corresponde ao valor de pico da corrente e T_{d30} representa o tempo de frente equivalente, sendo $T_{d30} = T_{30}/0,6$, em que T_{30} corresponde ao tempo necessário para o aumento da amplitude da onda de corrente de $0,3I_P$ a $0,9I_P$.

2 O comprimento efetivo (L_{ef}) pode ser definido como o comprimento limite do eletrodo suficiente para dissipar a maior parcela de corrente de surto injetada no sistema de aterramento.

| | ρ e ϵ constantes | | $\rho(\omega)$ e $\epsilon(\omega)$ | |
|--------|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| | Primeiras descargas | Descargas subsequentes | Primeiras descargas | Descargas subsequentes |
| 100 | 11 | 6 | 12 | 6 |
| 1.000 | 35 | 20 | 49 | 26 |
| 10.000 | 168 | 105 | 190 | 108 |

3.1 Segmentação do eletrodo

O primeiro passo para aplicação do Método dos Momentos na solução do modelo consiste em dividir o eletrodo de aterramento em segmentos menores. Neste caso, a segmentação do eletrodo é feita de modo a atender duas condições. A primeira é que a relação entre o comprimento do segmento (l) e o seu raio (a) deve ser muito maior do que 1 ($l/a \gg 1$). Dessa forma, pode ser aplicado o conceito de *thin wire approximation*, que permite aproximar a corrente total no condutor por uma corrente filamentar que se propaga no seu eixo (14), (23). Segundo (24), na prática é satisfatório assumir o valor de 10 para a relação l/a , ou seja, o comprimento do segmento pode ser considerado 10 vezes o raio do mesmo. A segunda condição a ser atendida é que l deve ser menor ou igual do que um décimo do comprimento de onda no solo (λ_s), calculado para a maior frequência de interesse (24-26). Com base nessas informações, a segmentação do eletrodo, que possui raio de 10 mm, é feita considerando quatro valores diferentes para o comprimento do segmento, sendo $l = 10a = 0,10$ m, $l = 50a = 0,50$ m, $l = 200a = 2$ m e $l = 500a = 5$ m. A segmentação de $10a$ é utilizada nas simulações como referência, com o objetivo de avaliar a influência da utilização de segmentos maiores, como os de $50a$, $200a$ e $500a$, na resposta do sistema de aterramento. A discretização do eletrodo em segmentos maiores contribui para uma redução no custo computacional das simulações.

4.0 - RESULTADOS

4.1 Influência da segmentação do eletrodo no GPR

Avalia-se a influência do comprimento do segmento do eletrodo de aterramento no valor do GPR³ desenvolvido no ponto de injeção de corrente. Consideram-se os parâmetros elétricos do solo (ρ e ϵ) constantes e também variáveis com a frequência. Com relação à excitação, a resposta do sistema é obtida para as primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, cujas formas de onda são mostradas na Figura 1. O comprimento do eletrodo de aterramento, determinado de acordo com as características mencionadas, é definido na Tabela 1. Os gráficos da Figura 3 são obtidos considerando os parâmetros elétricos do solo independentes da frequência, enquanto nos gráficos da Figura 4 é considerada a dependência dos mesmos com a frequência.

Antes de iniciar a análise da influência do comprimento do segmento no comportamento do GPR, são feitas algumas observações a respeito deste parâmetro. Observa-se que os maiores níveis de GPR são obtidos em solos com resistividades mais elevadas. Esta característica pode ser observada tanto nas curvas que consideram os parâmetros elétricos do solo constantes como nas que consideram a dependência destes com a frequência. A consideração da variação da permissividade e resistividade com a frequência implica na redução da amplitude do GPR. Observa-se que a redução no pico do GPR é mais acentuada em solos com resistividades mais elevadas, tanto para as primeiras descargas quanto para as descargas subsequentes. Os gráficos mostram que a consideração dos parâmetros do solo variáveis com a frequência também provoca a alteração da forma de onda do GPR, que é mais intensificada com o aumento da resistividade do solo. Isso acontece devido aos efeitos condutivos serem mais pronunciados em altas frequências quando se considera a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Este efeito influencia a defasagem da impedância harmônica no domínio da frequência que resulta na alteração da forma de onda do GPR no domínio do tempo.

As análises seguintes são referentes aos resultados obtidos considerando as diferentes segmentações do eletrodo. Observa-se que tanto para as primeiras descargas de retorno quanto para as descargas subsequentes, a utilização do comprimento do segmento igual a $50a$, $200a$ e $500a$ produz resultados muito próximos, assumindo os parâmetros do solo constantes ou variáveis com a frequência. Em todos os casos, tem-se que o valor do GPR para as diferentes segmentações é superior ao obtido para $l = 10a$ no intervalo de tempo analisado. Entretanto, essa diferença entre as curvas obtidas para cada segmentação não excede a 10% do GPR calculado considerando o comprimento de $10a$. A tolerância de erros da ordem de 10% é admissível, em

³ Do inglês *Ground Potential Rise*. É definido como a elevação de potencial desenvolvido no ponto de injeção de corrente. O GPR é considerado um parâmetro de grande importância na análise da resposta transitória de aterramentos elétricos solicitados por correntes impulsivas. Por meio deste é possível determinar a tensão máxima que o aterramento fica submetido assim como o instante de tempo em que esse valor máximo ocorre.

função dos erros associados ao procedimento de medição em campo. A consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência reduz o nível do GPR nas curvas em que l é igual a $10a$, assim como no caso das demais segmentações. Observa-se que as curvas do GPR obtidas para $l = 50a$, $200a$ e $500a$ são bastante similares à curva utilizada como referência, que considera o comprimento de $10a$.

4.2 Redução do custo computacional

O principal objetivo da metodologia apresentada, que propõe a utilização de segmentações maiores do que a proposta na literatura ($l = 10a$) é estabelecer um compromisso entre a redução do tempo gasto nas simulações e a precisão dos resultados. Na Tabela 2 são apresentados os resultados para os casos base definidos neste trabalho. Para cada resistividade tem-se o comprimento de segmento (l) que resulta na maior redução percentual no tempo de realização das simulações computacionais. A redução percentual é calculada considerando como referência o tempo gasto nas simulações para $l = 10a$. Observa-se que em todos os casos, para as primeiras descargas e descargas subsequentes, considerando os parâmetros do solo fixos e variáveis com a frequência, a redução do tempo computacional aumenta gradativamente com o aumento da resistividade do solo, uma vez que, a extensão dos eletrodos é maior para resistividades mais elevadas.

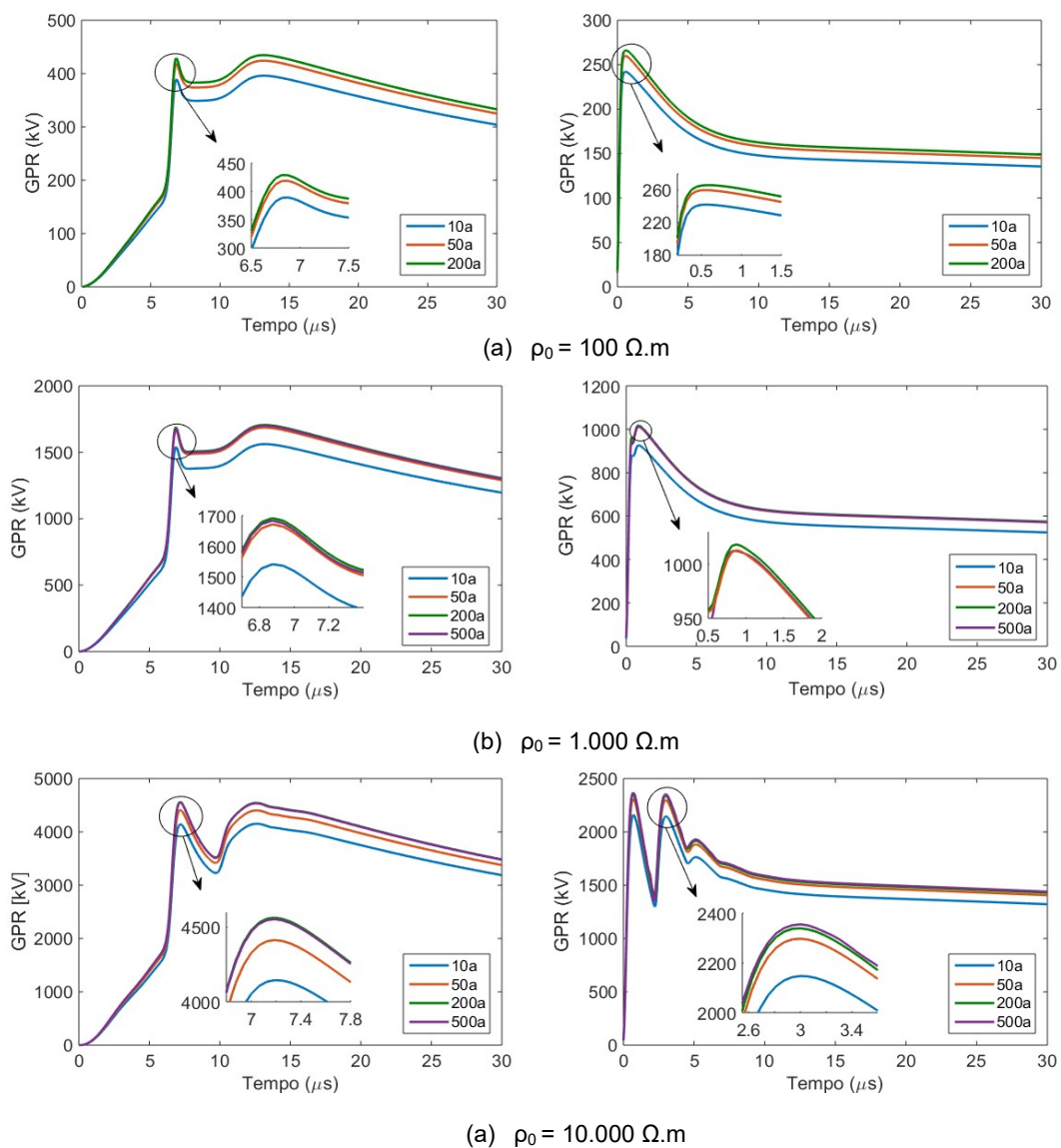


Figura 3 - GPR desenvolvido no ponto de injeção de corrente de um eletrodo horizontal solicitado pelas primeiras descargas de retorno (curvas da esquerda) e descargas subsequentes (curvas da direita), considerando os parâmetros do solo constantes.

Tabela 2 - Redução do tempo computacional gasto nas simulações de acordo com o comprimento do segmento.

| ρ_0 ($\Omega \cdot m$) | Parâmetros do solo constantes com a frequência | | | | Parâmetros do solo variáveis com a frequência | | | |
|-------------------------------|--|----------|-----------------|----------|---|----------|-----------------|----------|
| | Primeiras desc. | | Descargas subs. | | Primeiras desc. | | Descargas subs. | |
| | l (m) | Red. (%) | l (m) | Red. (%) | l (m) | Red. (%) | l (m) | Red. (%) |
| 100 | 200a | 27,71 | 200a | 38,67 | 50a | 32,98 | 50a | 39,43 |
| 1.000 | 200a | 71,02 | 200a | 80,61 | 200a | 78,59 | 50a | 81,23 |
| 10.000 | 200a | 93,00 | 500a | 88,93 | 500a | 92,82 | 200a | 88,38 |

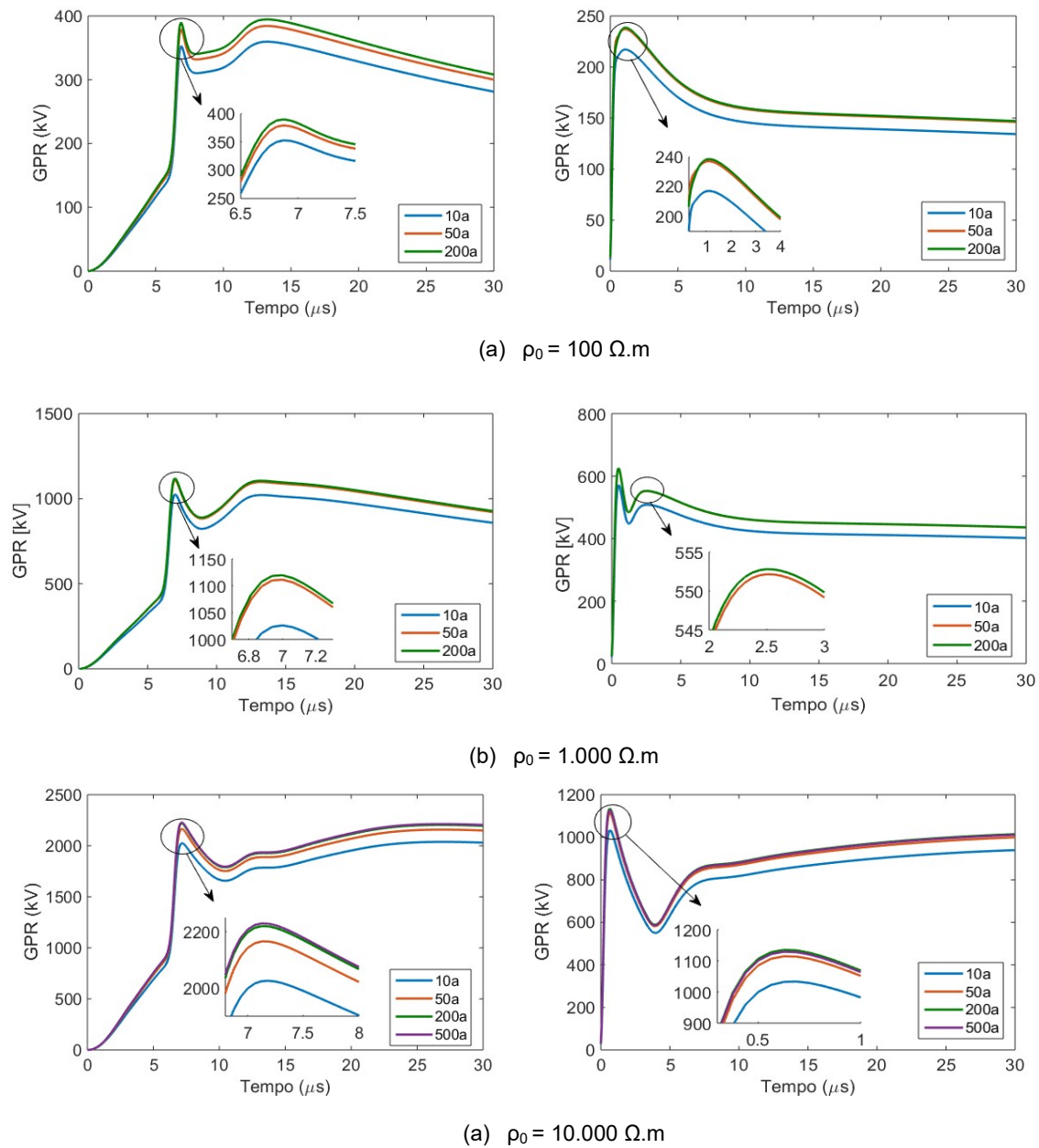


Figura 4 - GPR desenvolvido no ponto de injeção de corrente de um eletrodo horizontal solicitado pelas primeiras descargas de retorno (curvas da esquerda) e descargas subsequentes (curvas da direita), considerando a dependência dos parâmetros do solo com a frequência.

De uma maneira geral, observa-se que a utilização dos comprimentos equivalentes a $50a$, $200a$ e $500a$ reduz consideravelmente o tempo gasto nas simulações e produz resultados satisfatórios, conforme apresentado na seção 4.1. A maior redução registrada do tempo de simulação foi de aproximadamente 93%, para a resistividade de $10.000 \Omega.m$ considerando as primeiras descargas de retorno e os parâmetros do solo constantes e variáveis com a frequência. Neste caso, utilizando um comprimento de segmento de $10a$ o tempo computacional foi em torno de 3 horas e 20 minutos, enquanto que para o comprimento de $200a$ foi de 14 minutos. Esta simulação foi implementada no software MATLAB®, em um computador com processador Intel i7 (3770), com 16 GB de memória RAM e 3.4 GHz de *clock*. É importante mencionar que a duração do processo de simulação é altamente influenciada pelo modelo de computador utilizado, habilidade do programador e linguagem de programação.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho é implementado um programa computacional que permite determinar o comportamento transitório de sistemas de aterramento frente a solicitações típicas de descargas atmosféricas. O objetivo principal é determinar segmentações para o eletrodo de aterramento de modo a reduzir o tempo computacional gasto nas simulações sem comprometer a confiabilidade dos resultados.

Os resultados mostram que as curvas obtidas para o GPR, considerando o comprimento do segmento igual ou maior que $50a$, são muito próximas. A diferença entre as curvas que consideram l igual a $50a$, $200a$ e $500a$, e a curva obtida para l igual a $10a$ (referência) é inferior a 10%. As formas de onda para os comprimentos considerados são muito similares tanto para injeção de primeiras descargas quanto de descargas subsequentes. Observa-se uma redução significativa no pico do GPR quando os parâmetros do solo são considerados variáveis com a frequência, para as curvas que consideram a segmentação de $10a$ assim como para as demais segmentações.

De uma maneira geral, observa-se que a utilização das segmentações propostas resulta em uma redução considerável do tempo computacional gasto nas simulações, podendo chegar até a 93%, quando comparado ao tempo obtido para o comprimento de $10a$. Percebe-se que conforme a resistividade do solo aumenta, devido à maior extensão dos eletrodos, o ganho computacional também aumenta. Tal fato reforça o benefício da metodologia proposta, uma vez que em solos com resistividades mais elevadas faz-se necessária a utilização de eletrodos mais extensos, o que aumenta a duração das simulações.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY. POWER SYSTEM TECHNOLOGIES COMMITTEE. IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems. IEEE, 1982.
- (2) IEEE Std 80. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE, 2003.
- (3) ABNT, NBR. 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. **Rio de Janeiro**, 2004.
- (4) VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 22, n. 1, p. 381-386, 2007.
- (5) ALIPIO, R. Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência. **Belo Horizonte, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-CEFET/MG**, 2008.
- (6) VISACRO, S., ALIPIO, R., VALE, M. H. M., PEREIRA, C. The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 53, n. 2, p. 401-406, 2011.
- (7) ALIPIO, R., VISACRO, S. Impulse efficiency of grounding electrodes: Effect of frequency-dependent soil parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 2, p. 716-723, 2014.
- (8) ALIPIO, R., VISACRO, S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 56, n. 5, p. 1163-1171, 2014.

- (9) VISACRO, S., ALIPIO, R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 2, p. 927-935, 2012.
- (10) VISACRO, S., SOARES, A. J., SCHROEDER, M. A. O. An interactive computational code for simulation of transient behavior of electric system components for lightning currents. In: **Proc. 26th Int. Conf. Lightning Protection**. 2002. p. 732-737.
- (11) VISACRO, S., SOARES, A. HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 20, n. 2, p. 1206-1208, 2005.
- (12) VISACRO, S., PORTELA, C. Investigation of earthing systems behavior on the incidence of atmospheric discharges at electrical systems. In: **20th International Conference on Lightning Protection. 20th ICLP, Interlaken**. 1990.
- (13) VISACRO, S., PORTELA, C. Modeling of earthing systems for lightning protection applications, including propagation effects. In: **21th International Conference on Lightning Protection, 21th ICLP**. 1992. p. 133-138.
- (14) ADAMS, A. T. **Method of Moments Applications. Volume 1-An Introduction to the Method of Moments**. SYRACUSE UNIV NY DEPT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 1974.
- (15) HARRINGTON, Roger F. Matrix methods for field problems. **Proceedings of the IEEE**, v. 55, n. 2, p. 136-149, 1967.
- (16) SMITH-ROSE, R. L. Electrical measurements on soil with alternating currents. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v. 75, n. 452, p. 221-237, 1934.
- (17) VISACRO, S., PORTELA, C. M. Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems. In: **Symp. High Voltage Eng.** 1987.
- (18) VISACRO, S., ALIPIO, R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 2, p. 927-935, 2012.
- (19) ALIPIO, R., VISACRO, S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 56, n. 5, p. 1163-1171, 2014.
- (20) HEIDLER, F., CVETIC, J. M., STANIC, B. V. Calculation of lightning current parameters. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 14, n. 2, p. 399-404, 1999.
- (21) DE CONTI, A., VISACRO, S. Analytical representation of single-and double-peaked lightning current waveforms. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 49, n. 2, p. 448-451, 2007.
- (22) PAULINO, J. O. S., BOAVENTURA, W., LIMA, A. B., GUIMARÃES, M. F. Transient voltage response of ground electrodes in the time-domain. In: **2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. IEEE, 2012. p. 1-6.
- (23) GRCEV, L. D. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 11, n. 2, p. 815-823, 1996.
- (24) GRCEV, L., DAWALIBI, F. An electromagnetic model for transients in grounding systems. **IEEE transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 4, p. 1773-1781, 1990.
- (25) OLSEN, R. G., WILLIS, M. C. A comparison of exact and quasi-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2, p. 1071-1081, 1996.
- (26) GRCEV, L., ARNAUTOVSKI-TOSEVA, V. Grounding systems modeling for high frequencies and transients: Some fundamental considerations. In: **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**. IEEE, 2003. p. 7 pp. Vol. 3.

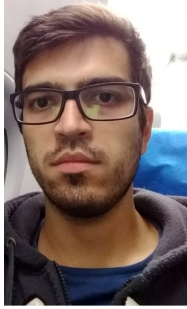
7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Natália Rodrigues de Melo: nasceu em Formiga-MG em 1990. Possui graduação em engenharia elétrica pelo Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Participou do programa de graduação sanduíche da University of Michigan, EUA. Atualmente tem como interesse estudo de desempenho transitório de aterramentos elétricos devido a descargas atmosféricas e desempenho de linhas de transmissão.



Marco Aurélio de Oliveira Schroeder: nasceu em Cataguases-MG, em novembro de 1968. 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 associado do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). No período de 2017 a 2018 desenvolveu seu pós-doutorado no Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa (IL). É líder do Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), cadastrado na base do CNPq, e Coordenador Adjunto do Laboratório Integrado de Pesquisas Eletromagnéticas (LAIPE) do DEPEL/UFSJ. É pesquisador credenciado no Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE) e frequentemente coordena projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Atua nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Técnicas de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento.



Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura: nasceu em Pará de Minas-MG em 1990. Possui graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de São João del-Rei e doutorado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Sua especialidade é nos seguintes tópicos: modelagem eletromagnética e transitória de aterramentos elétricos, linha de transmissão, descargas atmosféricas e coordenação de isolamento. Atualmente é coordenador do Laboratório Integrado de Pesquisas Eletromagnéticas (LAIPE / DEPEL / UFSJ).



Patrícia Campos Marcelino: nasceu em Congonhas-MG em 1992. Possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Atualmente é Mestranda em engenharia elétrica pela UFSJ. Foi estudante do programa sanduíche de Engenharia Eletrônica e Tecnologia da Informática pela Universidade Técnica de Ilmenau (TU Ilmenau). Atuou como estagiária pela empresa do segmento automobilístico Mercedes Benz e Setra - Grupo Daimler na cidade de Mannheim , Alemanha. Sua especialidade é nos seguintes tópicos: resposta transitória de aterramentos elétricos, desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e coordenação de isolamento.