



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Metodologia simplificada para a caracterização da resposta transitória e de regime permanente de arranjos de aterramento

CARLOS ERMÍDIO FERREIRA CAETANO(1); JOSÉ OSVALDO SALDANHA PAULINO(1); WALLACE COUTO BOAVENTURA(1); IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES(1); MAURISSONE FERREIRA GUIMARÃES(2); CELIO FONSECA BARBOSA(1); EDUARDO NOHME CARDOSO(1); UFMG(1); Cemig D(2);

RESUMO

Neste artigo é apresentada uma nova metodologia para a caracterização de arranjos de aterramento no domínio do tempo. É demonstrado que, a partir do conhecimento da resposta da malha a uma onda de corrente rápida, é possível determinar o seu comportamento para qualquer forma de onda, inclusive para corrente contínua, obtendo com precisão a máxima elevação de potencial (GPR) e a resistência em corrente contínua da malha. Este artigo apresenta, como validação, os resultados de medições realizadas em uma malha de aterramento experimental.

PALAVRAS-CHAVE

Impedância de aterramento, Resistência de aterramento, Identificação de sistemas, Medição

1.0 - INTRODUÇÃO

A conexão de um circuito à terra é uma prática muito comum, tendo sido adotada há bastante tempo na proteção de seres vivos e do próprio sistema elétrico. Além disso, essa prática está associada à eficiência operacional do sistema, nos casos onde a terra é usada como um condutor de retorno. Em geral, um aterramento adequado requer baixo valor de impedância, e, como boa prática de projeto, este valor deve ser antecipado através de simulações computacionais. Após a construção do aterramento, este deve ter sua resposta verificada periodicamente através de medições.

A resposta de um sistema físico pode ser conhecida para uma infinidade de excitações: mecânica, térmica, sonora, etc. Na área dos estudos elétricos, o foco no aterramento está em conhecer a resposta deste quando solicitado por determinada forma de onda de corrente. Nesse caso, portanto, para se medir a resposta é necessário fazer circular pelo aterramento a corrente de interesse. A medição da resposta do aterramento à passagem dessa corrente, e a sua quantificação através do valor de resistência, é a prática mais comumente adotada, sendo, inclusive, utilizada como critério de proteção de sistemas em que as correntes de solicitações tenham componentes de frequência mais elevadas, como é o caso das descargas atmosféricas, por exemplo [1]. Entretanto, para muitas aplicações, a quantificação da resistência como valor representativo da resposta do aterramento nem sempre é suficiente [2], [3]. Nesses casos, descrever o arranjo de aterramento através de sua resposta dinâmica torna-se fundamental.

Todavia, nem sempre é possível obter a resposta do aterramento para a exata corrente de interesse, dado as limitações de instrumentos de geração da corrente de solicitação, do arranjo existente para a medição, e dos próprios instrumentos de medição disponíveis. Essa é uma limitação importante das técnicas atuais, visto que a caracterização do arranjo torna-se, portanto, quase sempre restrita à excitação em que a medição ocorreu. Esse

(*) Av. Pres. Antônio Carlos, n° 6627, LEAT/UFMG – Escola de Engenharia, CEP 31.270-901, BH, MG – Brasil
Tel: (+55 31) 3409-5474 – Email: ccaetano@ufmg.br

é o caso de alguns importantes indicadores que frequentemente encontramos nas análises de desempenho de arranjos de aterramento, como a impedância transitória [4] e a impedância impulsiva [3], por exemplo. Esses indicadores só existem para um único par de curvas de excitação e resposta do sistema de aterramento de interesse.

Em função dessa importante limitação, este informe técnico tem como objetivo apresentar uma nova metodologia capaz de caracterizar, de forma segura e mais abrangente, a resposta de arranjos de aterramento, seja esta resposta descrita através da resistência ou através do comportamento dinâmico do arranjo de interesse. Por forma mais abrangente, entende-se a possibilidade de conhecer, a partir de uma única medição, a resposta do arranjo de aterramento a outras formas de onda de interesse, sem que se precise realizar novas medições. Isso é possível através da determinação da resposta ao impulso do sistema de aterramento, utilizando para isso conceitos de identificação de sistemas através da aplicação de ferramentas de modelagem paramétrica [5]-[7].

A metodologia proposta é relativamente simples de ser aplicada, e uma vez conhecida a resposta ao impulso do sistema de aterramento, a resposta a outras formas de onda pode ser determinada através de uma operação de convolução. Essa é uma abordagem poderosa para efeitos práticos, garantindo que a resposta temporal do aterramento sob análise seja conhecida para diversas ondas de interesse, como as representativas de descarga atmosféricas, ou mesmo as formas de onda normalizadas para ensaios de suportabilidade de isolamento, por exemplo, sem que a medição do aterramento precise ser realizada para todas as diferentes formas de onda necessárias na análise, ou mesmo sem que seja necessário dispor de diferentes geradores para se obter as respectivas formas de onda.

Este informe técnico está dividido da seguinte forma: Na Seção 2, são apresentados os conceitos que sustentam a metodologia de síntese da resposta do aterramento, detalhando a estratégia de abordagem ao problema. Na Seção 3, um conjunto de simulações computacionais é apresentado, de forma a se verificar a eficácia da técnica e compreender seu potencial de aplicação. Para isso, um arranjo de aterramento composto por um cabo contrapeso foi simulado, utilizando a teoria de linhas de transmissão. Na Seção 4, são apresentados os resultados da aplicação da técnica em curvas de medições em um arranjo real de aterramento. Nas Seções 5 e 6 são apresentadas as discussões e considerações de ordem prática e as conclusões deste informe técnico, respectivamente.

2.0 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO

Muitos dos conceitos de identificação de sistemas são bastante conhecidos, e enormemente aplicados em diversas áreas do conhecimento. Esses conceitos permitem a criação de modelos capazes de descrever desde sistemas simples, àqueles extremamente complexos e inatingíveis por outras abordagens que não a de identificação. Neste trabalho, algumas das técnicas disponíveis para a identificação de sistemas dinâmicos são discutidas e aplicadas. A abordagem adotada foi, por escolha, determinada como sendo uma modelagem caixa preta, que, por definição, é aquela em que pouco ou nenhum conhecimento do sistema é necessário a priori [5].

A escolha pela modelagem caixa preta se justifica, uma vez que, apesar de possuímos excelentes modelos físicos para descrever os mais variados arranjos de aterramento, raramente é possível ter acesso a informações precisas sobre as características do solo onde o arranjo de aterramento foi instalado, além de, claro, as condições em que determinado sistema de aterramento se encontra, após o decorrer de anos ou mesmo décadas desde a sua instalação.

A identificação do sistema de interesse pode ser feita através de duas diferentes abordagens: *i*) através do domínio do tempo, isto é, quando o conjunto de dados é composto por uma sequência de amostras discretizadas no tempo, ou *ii*) através do domínio da frequência, que é a condição onde o conjunto de dados é composto por uma sequência de amostras discretizadas na frequência. O conjunto de dados pode ser obtido diretamente nos respectivos domínios descritos, ou convertidos de um domínio ao outro, caso essa conversão acrescente vantagens à identificação.

Nesse trabalho, o foco da abordagem de identificação se dá para um conjunto de dados obtido diretamente no domínio do tempo. A técnica utilizada se baseia no método iterativo proposto pelos pesquisadores K. Steiglitz e L. E. McBride [6]. Segundo os autores, o método iterativo (que atualmente recebe o nome Steiglitz-McBride) é capaz de identificar um sistema linear e invariante no tempo (LIT) a partir de amostras dos sinais de excitação e de resposta do sistema, na presença de ruído, minimizando o erro quadrático médio entre as saídas do sistema e do modelo. O modelo identificado, $H(z)$, é descrito através de uma função de transferência, definida por uma razão de polinômios em z^{-1} , como apresentado na equação (1),

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{(nb)} z^{-nb}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{(na)} z^{-na}} \quad (1)$$

onde z é uma variável complexa, sem dimensão física, que descreve um plano onde estão alocados os polos e zeros da função de transferência descrita por $H(z)$.

A resposta ao impulso do sistema identificado, $h(n)$, (onde n é a representação, no domínio do tempo discreto, para o tempo), pode então ser obtida a partir do modelo paramétrico descrito por $H(z)$. Uma vez que $h(n)$ tenha sido determinada, o comportamento do sistema dinâmico que modela o arranjo de aterramento está definido, diretamente no domínio do tempo discreto, e poderá ser utilizado na descrição da resposta deste para quaisquer ondas de solicitação, desde que estas respeitem a faixa de linearidade do arranjo de aterramento. Em outras palavras, esta restrição significa que deverá haver um critério de limitação para a escolha da onda de corrente simulada, uma vez que esta não poderá levar, caso fosse injetada no aterramento, à condição de ionização, por não haver, no modelo, a consideração necessária para caracterizar essa não-linearidade.

Ainda com relação aos efeitos de não-linearidades, ressalta-se que, caso o par de curvas de excitação e resposta do aterramento tenha sido medido na condição em que o sistema se encontra sob efeito de ionização do solo, o modelo obtido a partir destes vetores permitirá a identificação do sistema unicamente para o ponto de operação não-linear que tenha gerado o conjunto de dados. Essa é uma importante limitação do modelo de identificação adotado, uma vez que a reconstrução da resposta do aterramento, a partir de outras ondas de corrente, não possuirá mais correspondência com aquele ponto de operação.

Todavia, para efeitos práticos, a caracterização de arranjos de aterramento é realizada, na grande maioria dos casos, para a região de linearidade deste. Isso se deve ao fato de que os sistemas utilizados na medição de arranjos de aterramento se baseiam na aplicação de ondas de corrente de pequena magnitude, não sendo capazes, portanto, de provocar a ionização do solo. Além disso, os efeitos de ionização do sistema de aterramento, como mostrados em [8], resultam em valores menos conservativos para a caracterização do arranjo.

Para se obter o modelo de um sistema LIT, foi utilizada uma rotina computacional baseada no método de Steiglitz-McBride [6], desenvolvida no software MATLAB®. Essa função utiliza como entrada os vetores de dados de excitação e resposta do sistema a ser modelado, que correspondem, no caso de interesse, respectivamente à corrente injetada no aterramento e à GPR. O algoritmo solicita que seja informado, a priori, o número de polos e zeros da função de transferência a ser sintetizada, além do número de iterações que a rotina deverá executar. Uma vez que o par de curvas medido é fornecido à rotina computacional desenvolvida, ela retorna com os coeficientes do polinômio descrito pela equação (1). Um diferencial em se obter o modelo matemático do arranjo de aterramento diretamente através de curvas medidas, está no fato do modelo possuir, intrinsecamente, efeitos como a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência [9].

3.0 - AVALIAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Para a simulação das condições pressupostas e verificação de viabilidade da metodologia, se faz necessário obter dados que relacionem a entrada e a saída de um determinado sistema dinâmico de interesse. No caso de aplicação ao estudo de aterramentos, o que se pretende é obter a descrição do sistema através de uma impedância. Para isso, o vetor de entrada do sistema, a corrente injetada no aterramento, e o vetor de resposta do sistema, a GPR, deverão ser adequadamente obtidos.

O modelo de cálculo da impedância adotado nas simulações é baseado na Teoria de Linhas de Transmissão (TL), conforme descrito em [10]. Este modelo foi escolhido por apresentar notável simplicidade computacional e boa representação do sistema estudado [11], levando em consideração as características geométricas e os parâmetros elétricos escolhidos. A Figura 1 representa o arranjo de aterramento modelado. Ele é composto por um cabo contrapeso, enterrado em um solo uniforme e acessado a partir de uma de suas extremidades. A corrente é injetada no aterramento a partir da extremidade acessível, e a GPR é obtida para este mesmo ponto.

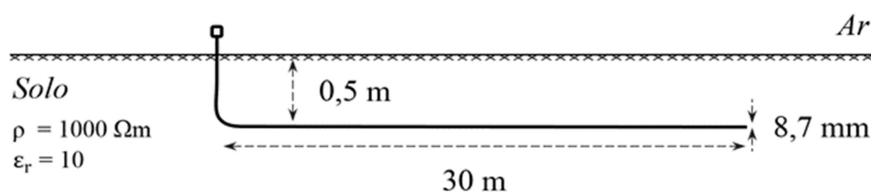


FIGURA 1 – Representação do arranjo de aterramento modelado nas simulações.

Para se obter a resposta ao impulso do sistema de aterramento, uma onda de corrente rápida, apresentada na Figura 2, foi utilizada. Nesta mesma figura é apresentada também a curva de resposta do sistema, a GPR, na terminação do eletrodo, provocada pela passagem da respectiva corrente de solicitação. Foi utilizada uma corrente com a forma de onda do tipo dupla exponencial, 0,1/2,5 μ s. A onda de corrente foi normalizada para que possuísse amplitude máxima de 1 A.

A partir dos resultados simulados, a metodologia descrita na seção anterior foi aplicada, tendo como variáveis de entrada os vetores de dados simulados para a GPR e para a corrente, $v(n)$ e $i(n)$, respectivamente. Este caso foi denominado como sendo o Caso A.

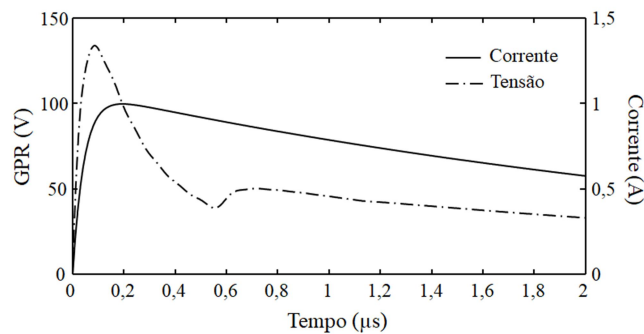


FIGURA 2 – Curvas de corrente e tensão simuladas, utilizadas como vetores de entrada para síntese de $h(n)$ do Caso A.

A verificação da metodologia se deu através da comparação das curvas obtidas por meio de reconstrução, considerando o uso do modelo de síntese da resposta ao impulso, com as curvas de referência obtidas diretamente da teoria de linha de transmissão. Para isso, os casos de interesse prático, mostrados na Figura 3, foram calculados.

A Figura 3 apresenta a resposta do aterramento quando solicitado por duas ondas de corrente distintas. Na Figura 3.a, a simulação foi realizada para uma onda de corrente do tipo dupla exponencial, 1,2/50 μ s. Esta forma de onda é comumente adotada em normas de ensaios de estruturas isolantes [12] para representar a sobretensão provocada por surtos de origem atmosférica, mas é aqui utilizada para a corrente, visando reproduzir, aproximadamente, o seu conteúdo espectral. Na Figura 3.b, a simulação foi realizada para uma onda representativa da primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica, conforme apresentado por Rachidi *et al.* [13]. Vale observar que ambas as ondas de corrente foram normalizadas para apresentarem valores máximos igual a 1 A.

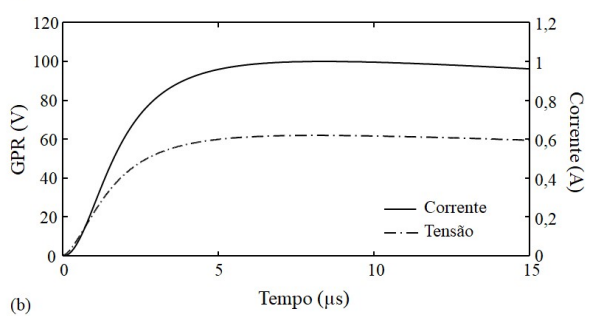
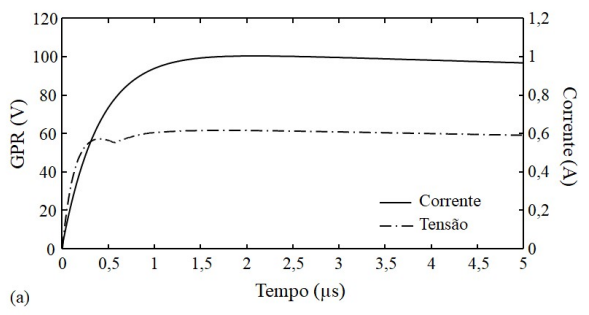


FIGURA 3 – Curvas de corrente e tensão simuladas para as ondas de interesse, utilizadas como referência na comparação com as ondas reconstruídas: (a) forma de onda normalizada, 1,2/50 µs [12]; (b) forma de onda da primeira corrente de retorno definida por Rachidi *et al.* [13].

A resposta ao impulso, $h(n)$, obtida das curvas mostradas na Figura 2, foi convoluída com as ondas de corrente de interesse. As ondas obtidas são chamadas de ondas reconstruídas, uma vez que estas são sintetizadas a partir de ondas de corrente diferentes daquela a que se destina a análise, e, só então, a partir do modelo gerado, as ondas a serem analisadas são construídas (ou, a rigor, reconstruídas a partir da informação das ondas de entrada). As ondas reconstruídas são então comparadas com as ondas de referência já mostradas na Figura 3. A Figura 4 apresenta essa comparação de curvas.

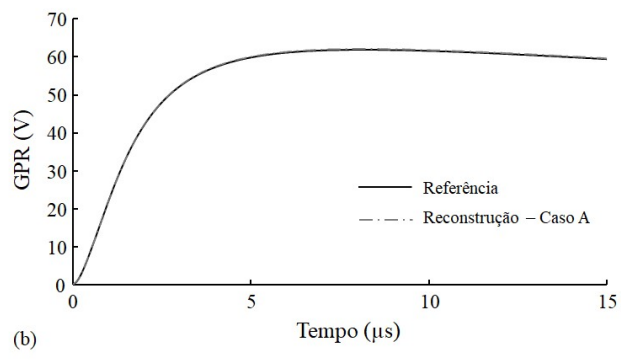
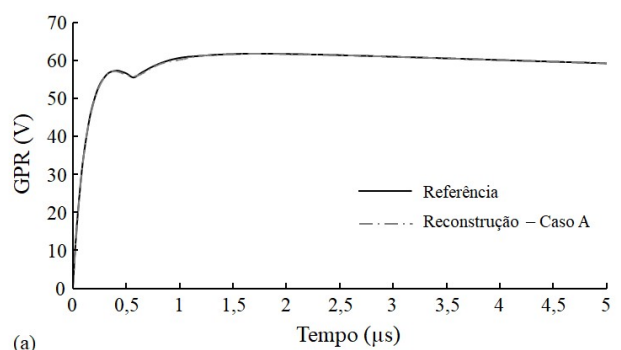


FIGURA 4 – Comparação das ondas reconstruídas com a curva de referência: (a) forma de onda normalizada, 1,2/50 µs [12]; (b) forma de onda da primeira corrente de retorno definida por Rachidi *et al.* [13].

Ao analisar as ondas simuladas, é possível constatar que a reconstrução da resposta do aterramento para a onda de corrente de interesse, através da convolução desta com a resposta ao impulso, $h(n)$, leva a resultados bastante satisfatórios para qualquer das curvas de interesse na análise. Fica evidente que, nesses casos, é possível extrair das curvas reconstruídas vários dos parâmetros de interesse prático, como por exemplo a impedância impulsiva ou a impedância transitória [4], que só seriam obtidos, se considerarmos que estamos simulando um processo de medição, se o aterramento fosse excitado pela exata onda de interesse.

4.0 - AVALIAÇÃO ATRAVÉS DE MEDIÇÕES

Para a validação experimental da metodologia proposta, o campo de testes do Laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT-UFGM) foi utilizado. O laboratório conta com eletrodos de aterramento horizontais com comprimentos de 18 m e 36 m e área de seção transversal igual a 50 mm². Estes eletrodos se encontram enterrados a uma profundidade de 0,2 metro. O arranjo experimental tem sido adotado em diversas pesquisas recentes, relatadas em [14]-[16]. A partir deste arranjo, um novo caso, denominado Caso B, foi medido e será descrito a seguir.

O Caso B corresponde ao arranjo com eletrodo de 18 metros de comprimento. A resistividade aparente do solo, no dia em que foram realizadas as medições deste caso, era de aproximadamente 100 Ω m. A Figura 5 apresenta um desenho representativo do arranjo de medição utilizado, enquanto a Figura 6 apresenta uma fotografia tirada para registro do arranjo de medição.

Para o Caso B, foram realizadas duas medições distintas. Na primeira medição, foi utilizada uma onda de corrente rápida, resultante da aplicação de uma diferença de potencial entre a malha de interesse e uma malha auxiliar, distante 45 metros da primeira. A GPR, referenciada no ponto de injeção de corrente, foi medida para um ponto distante 20 metros da malha sob testes, após se verificar que esta distância era suficiente para que a haste de potencial estivesse suficientemente afastada do eletrodo de aterramento, permitindo desprezar a resistência mútua. Na segunda medição, foi utilizada uma onda de corrente relativamente lenta, quando comparada à onda da primeira medição. O tempo de frente da onda de corrente da segunda medição é da ordem de grandeza do tempo de frente de ondas representativas da primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas. A onda de corrente e a GPR foram obtidas nas mesmas condições da medição anterior.

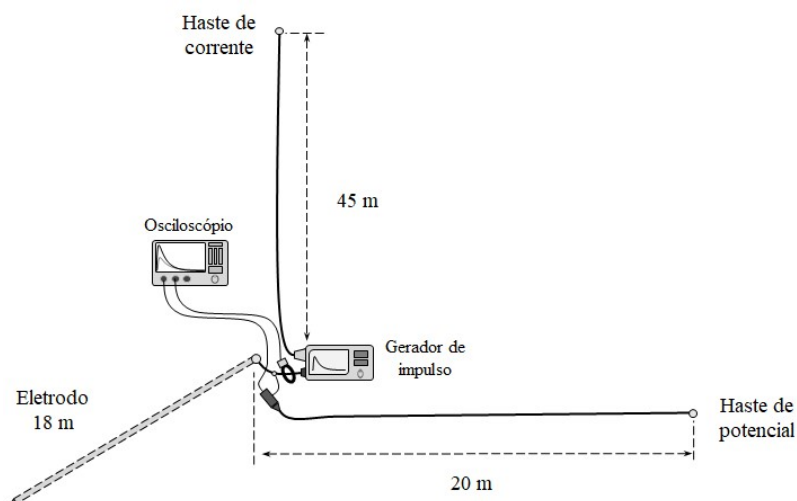


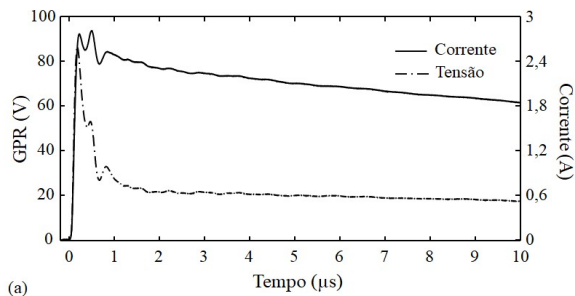
FIGURA 5 – Arranjo de medição utilizado na validação experimental da técnica.

Os circuitos auxiliares de tensão e de corrente foram dispostos em posições perpendiculares entre si, para evitar o acoplamento mútuo destes circuitos. Além disso, para evitar reflexões no circuito auxiliar de corrente, foi utilizado um resistor ajustável para casar a impedância deste circuito em sua terminação aterrada. Os pares de curvas de corrente e de tensão medidas para o Caso B são apresentados nas Figuras 7 e 8.

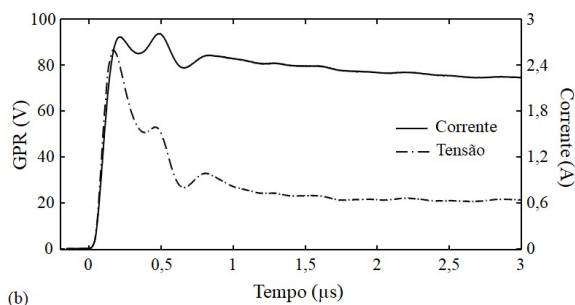


FIGURA 6 – Fotografia do arranjo de medição utilizado no Caso B.

A Figura 7 apresenta o par de curvas de tensão e de corrente usado para sintetizar a resposta ao impulso do arranjo, através da rotina de modelagem paramétrica. Na Figura 8 são apresentadas as curvas de medição utilizadas na validação, medidas para o mesmo arranjo e características, porém com a injeção de uma onda de corrente distinta daquela utilizada na modelagem do sistema de aterramento. A curva de GPR obtida a partir da medição com onda de corrente lenta foi usada como referência, para permitir a comparação dos resultados obtidos com a metodologia proposta.



(a)



(b)

FIGURA 7 – Formas de onda de corrente e da GPR medidas, usadas na síntese de $h(n)$, para o Caso B: (a) onda medida; (b) zoom nos primeiros microssegundos.

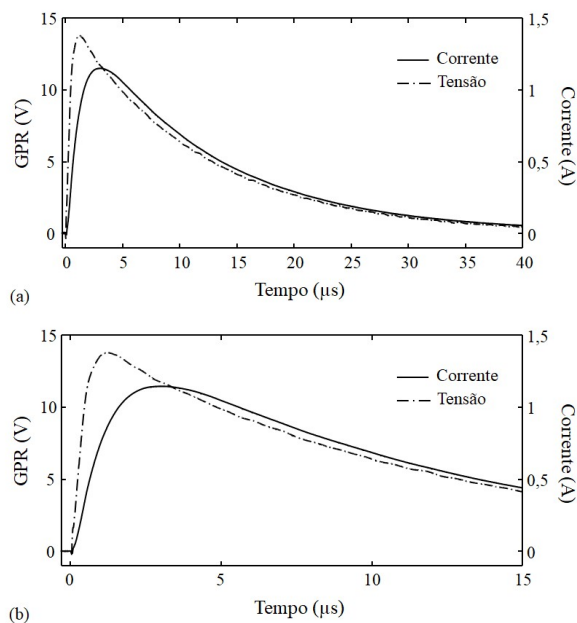
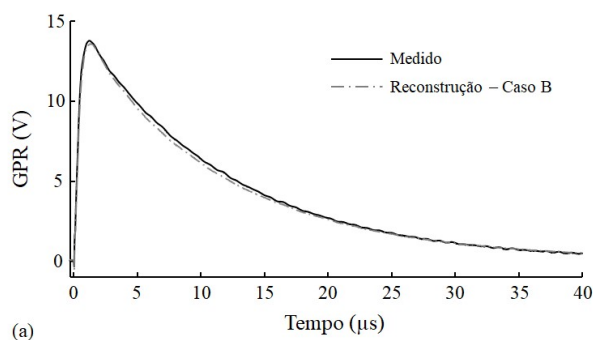


FIGURA 8 – Formas de onda de corrente e da GPR medidas, usadas como referência na comparação para o Caso B: (a) onda medida; (b) zoom nos primeiros microssegundos.

Uma vez que o aterramento tenha sido adequadamente modelado através da resposta ao impulso, $h(n)$, é possível obter a resposta deste arranjo para quaisquer ondas de corrente de interesse, conforme discutido ao longo deste informe técnico. Desta forma, para validação, a onda de corrente da Figura 8 foi adotada. A partir da convolução da onda de corrente lenta com a resposta ao impulso obtida, reconstruiu-se a curva de GPR do aterramento, que resultaria da injeção da nova onda de corrente. Como a resposta do arranjo de aterramento (GPR) foi também medida para a forma de onda lenta, Figura 8, foi possível realizar uma comparação direta da capacidade de reconstrução do método proposto. A Figura 9 apresenta essa comparação.

As curvas da Figura 9 evidenciam que a aplicação da técnica diretamente em curvas medidas, sem quaisquer necessidades de tratamento prévio dos dados, é possível e leva a bons resultados. Como pode ser observado, a curva reconstruída a partir da resposta ao impulso carrega toda a informação e dinâmica do aterramento, permitindo que parâmetros de aplicação prática já mencionados, como a impedância impulsiva, a impedância transitória, ou mesmo a resistência do aterramento, sejam adequadamente determinadas para as formas de onda de interesse, a partir, apenas, de um par de curvas de medição. Essas características são válidas desde que os critérios apresentados e discutidos neste informe técnico sejam atendidos.

Vale observar que os critérios originados nas informações da impedância impulsiva ou da impedância transitória, antes limitados ao par de curvas medido, agora poderão ter seus valores conhecidos para ondas outras que não apenas aquelas originadas da medição, auxiliando enormemente em projetos de proteção do sistema elétrico e nas análises de desempenho do mesmo.



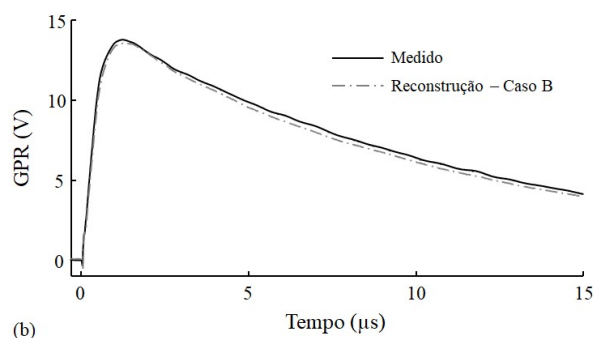


Figura 9 – Comparação da onda reconstruída com a respectiva curva de referência, usando a resposta ao impulso obtida do Caso B: (a) onda medida; (b) zoom nos primeiros microssegundos.

5.0 - CONSIDERAÇÕES DE ORDEM PRÁTICA

Os resultados de medição apresentados evidenciam um grande potencial de aplicação da técnica, mostrando não apenas a viabilidade, mas também que a qualidade de reconstrução das ondas de interesse é satisfatória. Uma das maiores contribuições dessa metodologia está no fato de que ela pode ser implementada em medidores de impedância ou mesmo no pós-processamento de medições já realizadas, garantindo, ao profissional responsável pela avaliação de desempenho dos sistemas aterrados, o acesso quase irrestrito à resposta do arranjo de aterramento para diferentes formas de onda de solicitação, caso estas análises sejam necessárias.

Como demonstrado, a correta implementação da técnica desonera da necessidade de se realizar medições diferentes, para formas de onda específicas, que sejam de interesse para a caracterização do aterramento. Essa abordagem permite não só a simplificação do gerador de ondas necessário à medição, como também o hardware dedicado a aquisição dos sinais, uma vez que ambos podem ser dimensionados para atender às características específicas de um único sinal de excitação, que seja capaz de caracterizar adequadamente o aterramento.

Por fim, a metodologia poderá ser usada de forma complementar à técnica de medição de aterramentos com o uso de LIAs (cabos de medição de pequeno comprimento, que se comportam como linhas de transmissão infinitas), [15], possibilitando, através do uso de ondas rápidas, a redução do comprimento destas, mesmo quando a análise do aterramento necessite ser realizada para ondas de corrente lentas.

6.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados e discutidos conceitos sobre o uso de metodologias de identificação de sistemas, tomando como exemplo de aplicação, e objeto de interesse, os sistemas representativos de arranjos de aterramento. O método foi avaliado através de simulações computacionais e através de curvas medidas, das quais se verificou uma excelente capacidade de reconstrução das ondas de interesse, a partir da resposta ao impulso obtida do modelo identificado.

Considerações de aspecto prático foram discutidas na Seção 5, onde foram apresentadas as principais contribuições do método, que envolvem desde o caráter facilitador de análise da resposta do sistema, até a redução das dimensões necessárias das LIAs, por exemplo. Como foi demonstrado, o método apresentado neste informe técnico é bastante promissor e de simples aplicação, possibilitando uma nova ótica na análise de sistemas de aterramento e viabilizando uma compreensão mais ampla dos impactos desses sistemas na proteção do sistema elétrico.

Conforme discutido neste informe técnico, a utilização de ondas de corrente com frente rápida é preferível, para garantir uma melhor aplicação da metodologia. Neste sentido, algumas vantagens adicionais podem ser elencadas. A utilização de uma onda de corrente com frente rápida permite a medição da impedância de aterramento de torres de linhas de transmissão, sem a necessidade de desconexão do cabo para-raios nem dos contrapesos, pois com a utilização de uma onda de frente rápida os efeitos dos aterramentos das torres adjacentes são minimizados, levando a mínimas alterações na caracterização do aterramento da torre de interesse. Outro fator relevante é que sem a desconexão dos contrapesos, as fundações da torre e as estruturas

de fixação dos estais serão levados em consideração na medição.

Ainda com relação ao uso de ondas de corrente com frente rápida, temos que a adoção de ondas de corrente com variação temporal rápida permite a utilização de geradores de tensão elevada ($> 1000\text{ V}$) sem colocar em risco os operadores, pois ondas rápidas possuem baixa energia. O uso de tensões elevadas auxilia na mitigação de interferências espúrias que poderiam afetar a medição. Por outro lado, é importante conhecer a resposta da malha para ondas mais lentas, típicas de uma descarga atmosférica principal, e a metodologia proposta permite isso.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J. T. Whitehead, "Lightning Performance of TVA'S 500-kV 161-kV Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 3, pp. 752–768, 1983.
- (2) L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 1, pp. 441–451, 2009.
- (3) S. Visacro, "The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 60, no. 5, pp. 1602–1605, 2018.
- (4) I. F. Gonos, "Transient impedance of grounding rods," in *11th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 99)*, 1999, vol. 1999, pp. v2-272-v2-272.
- (5) Luis Antonio Aguirre, *Introdução à Identificação de Sistemas; Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação*, 4a Edição. Belo Horizonte, 2015.
- (6) K. Steiglitz and L. McBride, "A technique for the identification of linear systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 10, no. 4, pp. 461–464, Oct. 1965.
- (7) B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, Jul. 1999.
- (8) A. M. Mousa, "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 3, pp. 1669–1677, Jul. 1994.
- (9) R. Alipio and S. Visacro, "Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, Oct. 2014.
- (10) J. O. S. Paulino, W. Do Couto Boaventura, A. Barros Lima, and M. F. Guimaraes, "Transient voltage response of ground electrodes in the time-domain," *2012 31st Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2012*, vol. 2, 2012.
- (11) L. Grcev, "Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 51, No. 3, pp. 559-571, August 2009.
- (12) IEEE Power and Energy Society, *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques*, vol. 13, no. May. 2013.
- (13) F. Rachidi *et al.*, "Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 43, no. 3, pp. 356–366, 2001.
- (14) C.E.F. Caetano, J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, J.C.O. Silva, and A.R. Panicali, "A New Method for Grounding Resistance Measurement Based on the Drained Net Charge," *IEEE Trans. Power Deliv.*, pp. 1–1, 2018
- (15) A.B. Lima, C.E.F. Caetano, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, I.J.S. Lopes, C.F. Barbosa, "An original setup to measure grounding resistances using fast impulse currents and very short leads," *Electr. Power Syst. Res.*, 2019
- (16) C.E.F. Caetano; J.O.S. Paulino; W.C. Boaventura; A.B. Lima; I.J.S. Lopes; E.N. Cardoso. "A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding: full-scale measurements," In: *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2018, Rzeszow, p. 1.

8.0 - DADOS BIográficos



CARLOS ERMÍDIO FERREIRA CAETANO possui graduação em Eng. de Controle e Automação e mestrado em Eng. Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 2015 e 2017, respectivamente. Atualmente é aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica da UFMG. Suas áreas de pesquisa incluem instrumentação, aterramentos elétricos, transitórios eletromagnéticos e compatibilidade eletromagnética.

JOSÉ OSVALDO SALDANHA PAULINO possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 1979 e 1985, respectivamente. Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Campinas, Campinas, Brasil, em 1993. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG desde 1980. Suas áreas de pesquisa incluem compatibilidade eletromagnética, descargas atmosféricas e alta tensão.

WALLACE DO COUTO BOAVENTURA possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 1988 e 1990, respectivamente. Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Campinas, Campinas, Brasil, em 2002. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG desde 1992. Suas áreas de pesquisa incluem compatibilidade eletromagnética, alta tensão e processamento de sinais aplicados aos sistemas elétricos de potência.

IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES graduou-se em Engenharia Elétrica e recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela UFMG, em 1987 e 1990, respectivamente. Em 2001, recebeu o título de Ph.D. em Engenharia Elétrica e de Computação pela University of Waterloo, Canadá. É professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG

onde atua desde 1992. Sua área de atuação inclui a engenharia de alta tensão e suas aplicações, materiais dielétricos e isolamento elétrico, e compatibilidade eletromagnética.

MAURISSONE FERREIRA GUIMARÃES graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG (2001). Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG (2003). Possui MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas (2014). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Trabalha como engenheiro na Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), onde já atuou em atividades na área de projetos, estudos técnicos e econômicos para linhas de transmissão e subestações de alta e extra-alta tensão. Desde 2009, tem-se dedicado a projetos de pesquisa, inovação e desenvolvimento de produtos tecnológicos voltados para o setor elétrico. Atualmente, é integrante do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica da UFMG como aluno de doutorado.

CELIO FONSECA BARBOSA recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista (1983), Mestre em Eng. Elétrica (1988) e Doutor em Eng. Elétrica (2009) pela Universidade Federal de Minas Gerais. Trabalhou na Telebrás (1984-1997), na Fundação CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (1998-2017) e atualmente é aluno de pós-doutorado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica da UFMG.

EDUARDO NOHME CARDOSO possui graduação em Eng. Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1977), mestrado em Eng. Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1982) e doutorado, também em Eng. Elétrica, pela Universidade Federal de Santa Catarina (1994). Atualmente está aposentado pela UFMG e atua em projetos de P&D nas áreas de desempenho de linhas de transmissão e de distribuição e sistemas de armazenamento de energia conectados às redes de distribuição.