



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

FI/GLT/03
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

SISTEMA PARA MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE MALHAS DE ATERRAMENTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO ONDAS IMPULSIVAS E CABOS DE PEQUENO COMPRIMENTO

Maurissone Ferreira Guimarães (*)
CEMIG
Wallace do Couto Boaventura
UFMG

José Osvaldo Saldanha Paulino
UFMG
Alexander Barros Lima
UFMG

RESUMO

Esse trabalho descreve uma metodologia para a medição da impedância transitória de malhas de aterramento de torres de linhas aéreas de transmissão utilizando um gerador de impulsos portátil e um novo arranjo de medição. Uma das vantagens da proposta é que a desconexão dos contrapesos da torre para medições é desnecessária. A metodologia proposta é apresentada e são mostrados os valores obtidos em medições realizadas no campo de testes da UFMG, no campo de testes da Universidade Corporativa da CEMIG e em uma linha real de 138 kV. Os valores medidos são comparados com simulações computacionais.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção contra descargas atmosféricas, impedância transitória de aterramento, desempenho de linha de transmissão, malha de aterramento.

1.0 - INTRODUÇÃO

As boas práticas de proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas requerem o conhecimento dos valores da impedância do aterramento das estruturas de suporte. A prática usual é a medição da resistência de aterramento em baixa frequência usando o Método da Queda de Potencial. No entanto, é importante ressaltar que os valores obtidos por meio desse método não expressam adequadamente a resposta do aterramento a uma solicitação impulsiva, como é o caso das correntes das descargas atmosféricas, sendo necessário utilizar uma constante empírica para cálculo da impedância de aterramento. Além disso, a medição da resistência de aterramento em linhas energizadas requer que os fios contrapesos sejam desconectados da estrutura e unidos em um ponto comum para evitar a interferência das estruturas adjacentes interconectadas metalicamente via cabo para-raios. Ressalta-se, ainda, que a desconexão dos cabos é tarefa de difícil execução, apresentando maiores custos e, também, riscos associados à segurança pessoal; além disso, nesse caso, a fundação da estrutura não entra no equivalente do valor de resistência medido, o que leva a valores inexatos. Outro inconveniente do Método de Queda de Potencial é a necessidade de se usar cabos de medição extensos, da ordem de 100 a 200 m. Destarte, a determinação direta da impedância de aterramento via um procedimento simples de medição é uma necessidade atual no Setor Elétrico Nacional.

Para contornar o problema acima descrito, foi desenvolvida uma nova metodologia para a medição direta da impedância de malhas de aterramento de estruturas de linhas de transmissão que utiliza um gerador de impulsos e um arranjo inédito com cabos de medição especiais de pequeno comprimento (< 20 m) que apresentam baixa velocidade de propagação (3% da velocidade da luz). Para o novo sistema de medição foi projetado e construído um protótipo de gerador, portátil e de pequenas dimensões e peso (300 g), o qual fornece uma onda de tensão de saída de 1,2 kV com 100 ns de tempo de frente. O valor de tensão de saída do gerador é adequado à operação segura do dispositivo. Com este novo sistema de medição, a contribuição da fundação da estrutura é levada em

consideração e não há necessidade de desconexão dos cabos da malha de aterramento ou dos cabos para-raios. Ademais, o novo sistema simplifica o trabalho envolvido no processo de medição.

Nesse trabalho, a impedância de aterramento medida e calculada é a *impedância transitória no domínio do tempo*, $Z(t)$, definida como sendo a relação entre a tensão que aparece da malha para um ponto distante, $V(t)$, e a corrente que flui pela malha ao longo do tempo, $I(t)$, conforme dado pela expressão [1]:

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I(t)} \quad [1].$$

Como parte dos testes do novo equipamento e validação da metodologia, foram realizadas medições de impedância de aterramento num campo de testes na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) de uma haste vertical de 2,4 m de comprimento e um fio contrapeso de 20 m de extensão. Adicionalmente, no campo de testes da Universidade Corporativa da CEMIG (UniverCemig) em Sete Lagoas - MG, foi medida a impedância de aterramento de uma malha de aterramento de uma torre de 138 kV e em uma linha em construção da CEMIG (LT138 kV Jaboticatubas – Pedro Leopoldo 3).

2.0 - BREVE REVISÃO BIBLIOGRAFICA SOBRE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

A medição de impedância de aterramento de torres de linha de transmissão é tarefa complexa, demorada e cara. Recentemente, foram obtidos avanços no sentido de facilitar a medição descritos em (1 a 6). A metodologia proposta nesse trabalho é semelhante à apresentada em (1), a qual propõe a utilização de cabos de medição longos (100 a 200 m). Em contraposição, a metodologia aqui proposta trabalha com cabos de, no máximo, 20 m de comprimento.

A metodologia proposta em (1) foi desenvolvida pela equipe do EPRI (*Electric Power Research Institute*) e após a proposição da metodologia de cabos curtos em (7) as equipes da UFMG, CEMIG e EPRI realizaram trabalhos conjuntos que foram publicados em (8 e 9).

3.0 - DESCONEXÃO DOS CONTRAPESOS E A UTILIZAÇÃO DE ONDAS IMPULSIVAS NA MEDIÇÃO

A medição da resistência de aterramento de uma torre utilizando uma onda de baixa frequência, sem a desconexão do cabo para-raios, não é um procedimento efetivo, pois as malhas de aterramento de todas as torres irão compor um circuito paralelo cujo valor da impedância equivalente é sempre muito baixo, mesmo se os valores das resistências das malhas das torres forem elevados (10).

Uma alternativa para a medição da impedância de aterramento do pé de torre é a utilização de uma onda impulsiva similar à da corrente de descarga atmosférica. Se a medição for feita sem a desconexão dos contrapesos da torre a medição levará em conta a contribuição da fundação da torre na definição do valor da impedância de aterramento.

Por outro lado, a utilização de uma onda impulsiva de frente rápida permite que a medição seja feita sem a necessidade de desconexão dos cabos para-raios. Isso é possível devido aos valores diferentes das velocidades de propagação das ondas nos cabos da malha e nos cabos para-raios, conforme explicado a seguir.

A velocidade de propagação das ondas nos cabos da malha de aterramento, que são cabos que estão enterrados no solo, depende do valor da permissividade, é dada pela expressão [2]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [2]$$

onde c é a velocidade de propagação da luz no vácuo e ϵ_r é a permissividade relativa do solo.

A literatura em geral sugere valores variando de 10 a 200 para a permissividade relativa (4). Tomando-se o valor da permissividade da água ($\epsilon_r = 80$) a velocidade de propagação no solo fica igual a 11% da velocidade da luz no vácuo. Ou seja, cerca de 10 vezes menor do que para um cabo no ar. Além disso, durante a propagação de uma onda impulsiva na terra, a frente da onda é distorcida à medida que viaja na terra, o que sugere uma velocidade aparente que é ainda menor do que aquela dada pela equação [2] conforme apresentado em (11).

O comprimento máximo de contrapeso utilizado pela CEMIG em suas linhas é 90 m (12). Um pulso propagando em um contrapeso de 90 m de comprimento enterrado em um solo com $\epsilon_r = 80$ leva um tempo igual a 2,72 μ s (tempo de trânsito) para atingir o final do cabo enterrado e 5,44 μ s para retornar ao início do cabo. Devido à resistividade do solo que atenua fortemente a onda viajante, a consideração de dois tempos de trânsito para a medição da impedância é suficiente, ou seja, um tempo de medição de 5 μ s é suficiente para medir a impedância da malha.

A distância entre torres em uma linha é da ordem de 300 m e a velocidade de propagação no cabo para-raios é da ordem de 90% da velocidade da luz. Isto significa que a excitação aplicada na base de uma torre irá atingir as torres adjacentes em $1,1 \mu\text{s}$ e a onda refletida voltará à malha sob medição em $2,2 \mu\text{s}$ e irá atingir as torres subsequentes às adjacentes em $2,2 \mu\text{s}$ e as reflexões atingirão a malha em cerca de $5 \mu\text{s}$. Em princípio, para uma malha de contrapesos de 90 m de comprimento a medição da impedância levará em conta a contribuição das malhas de cinco torres, a malha sob medição e as quatro torres adjacentes. Entretanto, na prática somente as duas torres adjacentes interferem de forma significativa na medição. A Figura 1 mostra uma simulação feita com o programa PSpice (13) onde uma onda impulsiva de corrente com tempo de frente igual a $0,5 \mu\text{s}$ foi utilizada para calcular a impedância transitória de uma malha de aterramento de torre. Nas simulações foram utilizados circuitos com uma torre, três e cinco torres. Pode ser visto na figura que o valor da impedância de aterramento calculada depende basicamente da malha da torre sob medição e das duas torres adjacentes. O acréscimo de mais duas torres no circuito praticamente não altera o valor da impedância. Na Figura 3 foram utilizados valores de resistividade do solo iguais a 250 e 5.000 Ωm .

É importante observar que no caso da incidência de uma descarga real, a tensão desenvolvida na torre atingida sofrerá a influência das torres adjacentes da mesma forma que ocorre na simulação ou medição com ondas impulsivas.

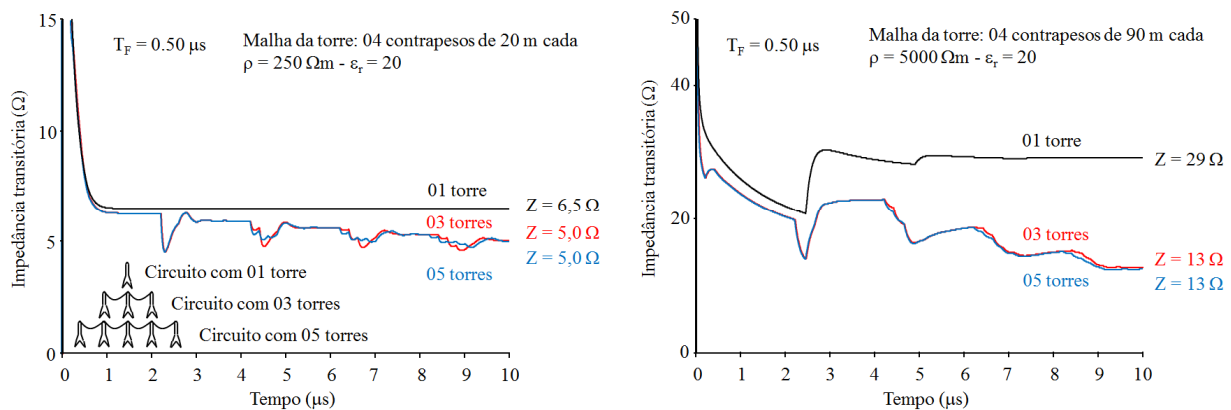


FIGURA 1 – Medição da impedância transitória da malha de uma torre, utilizando um circuito com uma, três ou cinco torres. Lado esquerdo, solo de 250 Ωm e malha de 04 contrapesos de 20 metros cada; lado direito, solo de 5.000 Ωm e malha de 04 contrapesos de 90 m cada, retirado de (13)

4.0 - LINHA DE TRANSMISSÃO DE BAIXA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (LIA)

Uma alternativa inédita para se evitar a utilização de malhas de aterramento auxiliares e também a utilização de cabos de grande comprimento é a utilização de uma linha de transmissão de baixa velocidade de propagação, a partir de agora denominada Linha Infinita Artificial (LIA). Esta tecnologia foi apresentada pela primeira vez em 2013, Referência (7), tendo sido solicitada sua patente.

A LIA é uma linha de transmissão feita com um fio fino isolado enrolado em um cano de PVC, como mostrado na Figura 2. A velocidade de propagação pode ser ajustada controlando o número de voltas por unidade de comprimento.



FIGURA 2 – Linha de transmissão infinita artificial constituída de um fio isolado espinado em um tubo de PVC

A Figura 3 mostra a medição da velocidade de propagação de uma LIA feita de fio isolado de $0,32 \text{ mm}^2$ enrolado em um tubo de PVC de 20 mm de diâmetro. Na Figura 3 pode se ver no oscilograma de corrente que a onda refletida retorna no tempo de $3 \mu\text{s}$, como a LIA tem comprimento total de 12 m, a velocidade de propagação é igual a $8 \text{ m}/\mu\text{s}$, ou seja, 2,7 % do valor da velocidade da luz no vácuo.

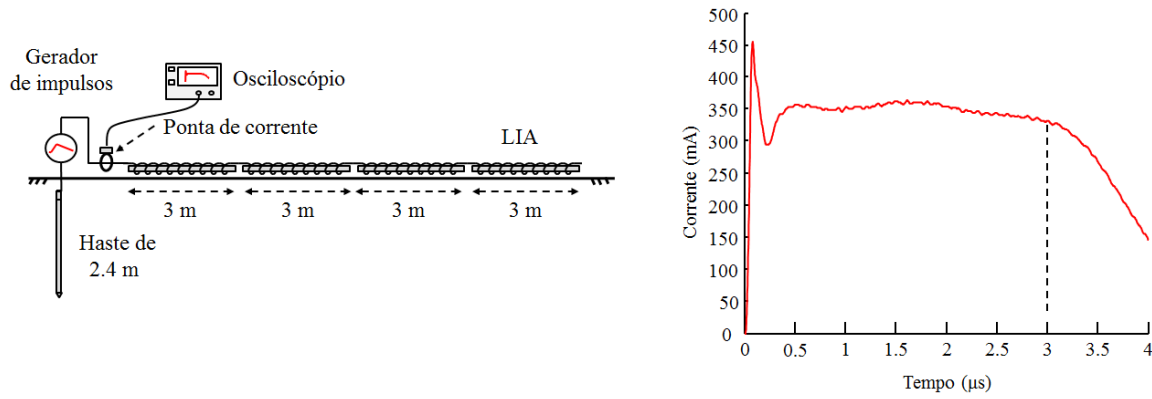


FIGURA 3 – Circuito para medição do tempo de trânsito na LIA e onda de corrente medida

Uma linha infinita artificial de 12 m de comprimento é equivalente, em termos de velocidade de propagação ou tempo de trânsito, a uma linha comum (constituída de um fio esticado) de 450 m de comprimento. Como o tempo de trânsito na LIA de 12 m de comprimento é igual a 1,5 μs , um impulso aplicado na linha só irá retornar ao início 3 μs depois de aplicado. Se a medição da impedância for feita até este instante de tempo a linha se comporta como se fosse infinita.

Outro fator que justifica a escolha de 12 m para o comprimento da LIA é a largura das faixas de servidão das linhas de alta tensão que são da ordem de 15 m para linhas de 138 kV. Um terceiro fator para a escolha de 12 m de comprimento é que existe no mercado tubos de PVC de 3 m de comprimento, o que significa que com quatro tubos de 3 m de comprimento pode ser feita uma LIA de 12 m.

5.0 - GERADOR DE IMPULSOS PORTÁTIL

O protótipo do gerador, portátil e de pequenas dimensões e peso (300 g) fornece uma tensão de saída de 1,2 kV e uma onda de 100 a 500 ns de tempo de frente e 40 μs de tempo de cauda. O valor de tensão é adequado à operação segura do dispositivo. A Figura 4 mostra uma fotografia do protótipo e a forma de onda de tensão a vazio.

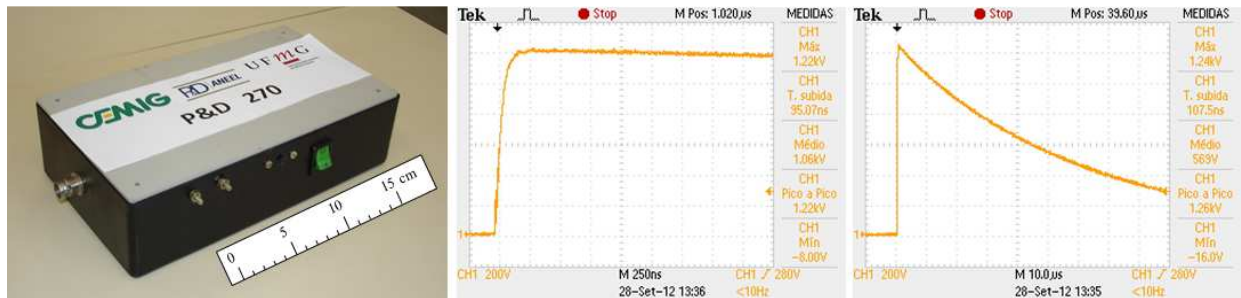


FIGURA 4. Protótipo de gerador de impulsos. Formas de onda de tensão do gerador a vazio (frente e cauda)

6.0 - ARRANJO DE MEDIÇÃO PROPOSTO

O arranjo de medição proposto é mostrado na Figura 5. Como a medição de impedâncias será feita em linhas energizadas, a extremidade da LIA e do cabo de tensão devem ser aterradas com uma pequena haste para se evitar choques devido à proximidade da linha energizada.

O circuito de injeção de corrente é formado pelo gerador e por uma LIA de 12 m de comprimento, o que permite que sejam feitas medições até cerca de 3 μs . A medição de tensão foi feita utilizando-se cabos de cobre isolados de comprimentos d_1 e d_2 . A Referência (14) sugere que para torre de linhas de transmissão a utilização de cabos de 7 e 20 m de comprimento leva a bons resultados. A mesma referência sugere que a impedância transitória da malha em relação a um ponto muito distante (∞), denominada $Z_{\infty}(t)$, pode ser obtida a partir de uma regreção linear simples através da expressão [3]:

$$Z_{\infty}(t) = \left[\frac{Z_{d2}(t)}{d_1} - \frac{Z_{d1}(t)}{d_2} \right] \cdot \left[\frac{d_1 d_2}{d_2 - d_1} \right] \quad [3]$$

onde: $Z_{d1}(t)$ e $Z_{d2}(t)$ são os valores das impedâncias medidas para cabos de tensão de comprimentos d_1 e d_2 respectivamente.

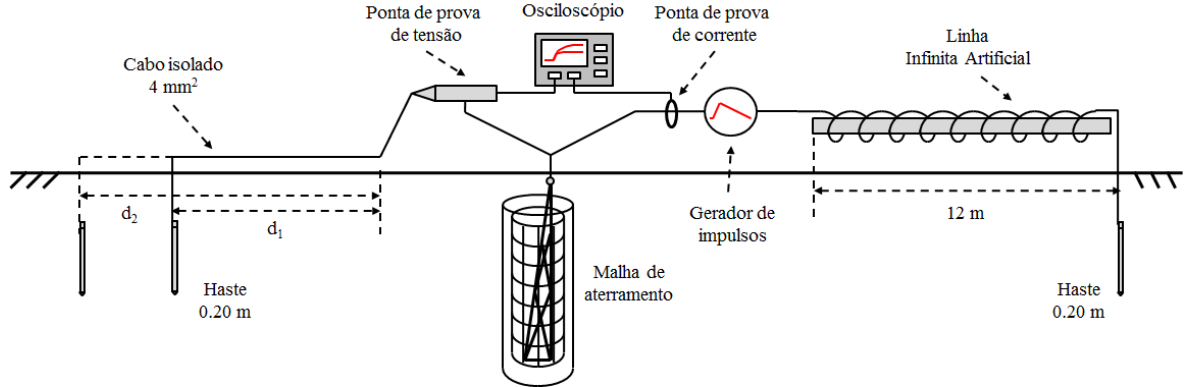


FIGURA 5 – Circuito de medição utilizando a linha infinita artificial

7.0 - RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES

7.1 Medições realizadas no campo de testes na UFMG

Foram realizadas medições em uma haste vertical de 2,4 m de comprimento, Figura 6, e em um cabo horizontal de 20 m de comprimento, Figura 7. Nas figuras são mostrados os resultados obtidos nas medições e os valores calculados para $Z_{\infty}(t)$. O valor da resistência medida com um *megger* foi denominado R_{CC} .

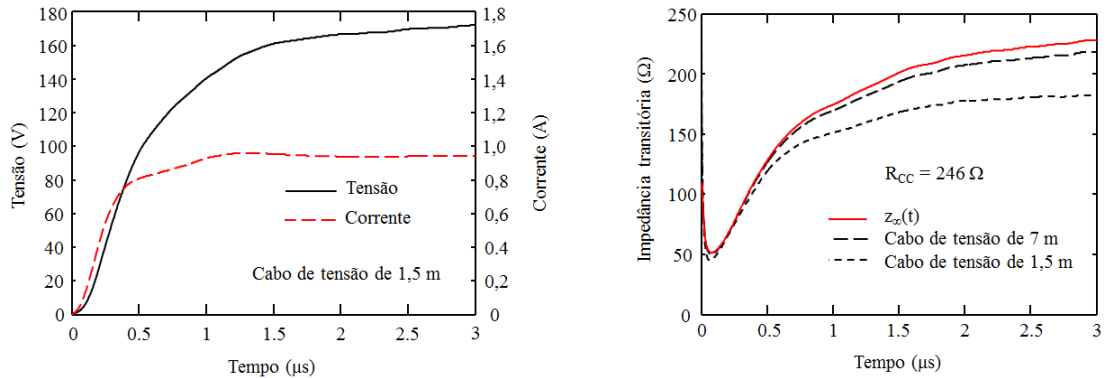


FIGURA 6 – Haste vertical de 2,4 m de comprimento: esquerda: tensão e corrente medidas (cabo de tensão de 1,5 m de comprimento); direita, impedâncias transórias medidas e valores calculados para o $Z_{\infty}(t)$

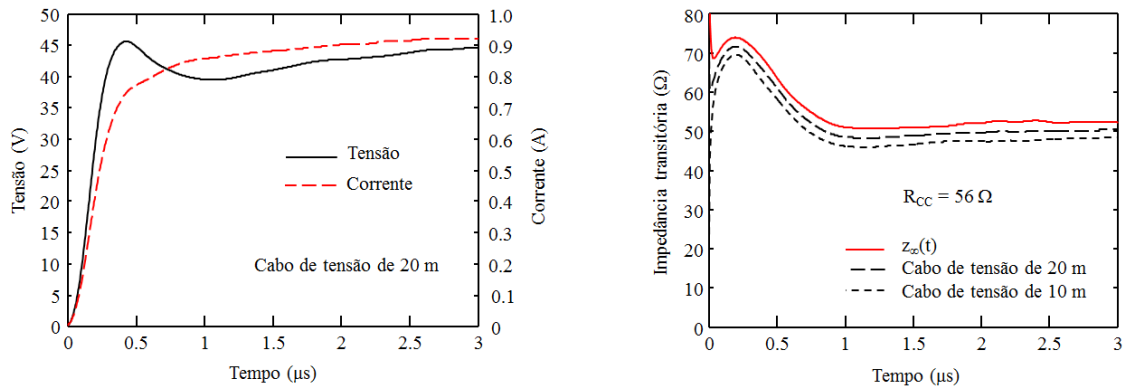


FIGURA 7 – Cabo horizontal de 20 m de comprimento: esquerda, tensão e corrente medidas (cabo de tensão de 20 m de comprimento); direita, impedâncias transórias medidas e valores calculados para o $Z_{\infty}(t)$

A Figura 8 mostra a comparação entre valores medidos, $Z_{\infty}(t)$, e calculados. Para o cálculo foi utilizado o programa PSpice e os parâmetros da malha foram calculados conforme dado em (15). O valor medido para a resistividade aparente do solo foi $607 \Omega \cdot m$. A permissividade relativa foi considerada como igual à da água ($\epsilon_r = 80$) para a haste de 2,4 m, pois a medição foi feita após um período chuvoso e o solo ainda estava muito molhado. No caso do cabo horizontal foi utilizado um valor menor para a permissividade ($\epsilon_r = 40$), devido ao fato do cabo estar enterrado a

apenas 0,25 m de profundidade e a camada superficial do solo estar mais seca.

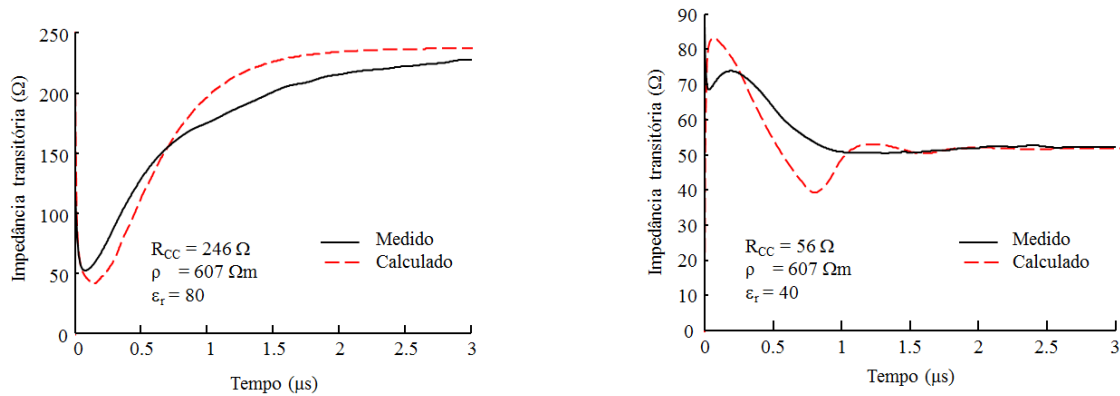


FIGURA 8 – Comparação entre valores medidos, $Z_{\infty}(t)$, e calculados: lado esquerdo, haste de 2,4 m de comprimento; lado direito, contrapeso de 20 m de comprimento

7.2 Medições realizadas em uma torre de 138 kV de uma linha em construção

Foram realizadas medições em uma linha de transmissão em construção (LT 138 kV Jaboticatubas – Pedro Leopoldo 3). Para tal foi utilizada uma perna de uma torre da LT que se constitui de fundação em tubulão conectada a um contrapeso de 30 m de comprimento. A Figura 9 mostra o arranjo utilizado. Para simulação, a fundação foi modelada como um eletrodo vertical de 3,5 m de comprimento inserido numa estrutura cilíndrica com concreto armado com 1 m de diâmetro. O valor medido para a resistividade aparente do solo foi 1600 $\Omega \cdot m$. A permissividade relativa foi considerada como igual à da água ($\epsilon_r = 80$) porque a medição foi feita em um dia chuvoso e o solo estava saturado de água.

A Figura 9 mostra os resultados obtidos na medição e na simulação. Este caso já foi apresentado na referência (7) e a novidade é o melhor resultado obtido nas simulação digital. A medição foi feita com uma LIA de 6 m de comprimento e um cabo de tensão de 20 m de comprimento.

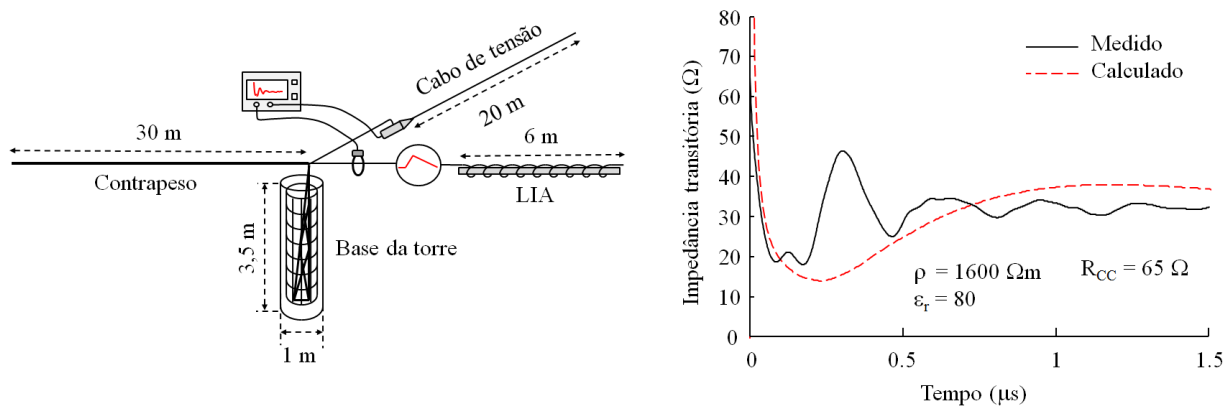


FIGURA 9 – Arranjo utilizado para a medição na torre de 138 kV de uma linha em construção; comparação entre valores medidos e calculados

7.3 Medições realizadas no campo de testes na UniverCemig

As medições foram realizadas em uma torre de 138 kV localizada na UniverCemig na cidade de Sete Lagoas-MG, onde há torres utilizadas para treinamento sobre técnicas de medições de resistência de aterramento. A resistência de uma torre foi medida com um *megger* e um valor de 62 Ω foi obtido. A medição da impedância transitória foi realizada utilizando uma LIA de 12 m de comprimento no circuito de corrente e um cabo de cobre isolado como cabo de potencial. Os comprimentos dos cabos de potencial utilizados foram 7 e 20 m. A Figura 10 mostra os resultados obtidos nas medições e os valores calculados para $Z_{\infty}(t)$. A Figura 11 mostra fotografias do arranjo de medição utilizado.

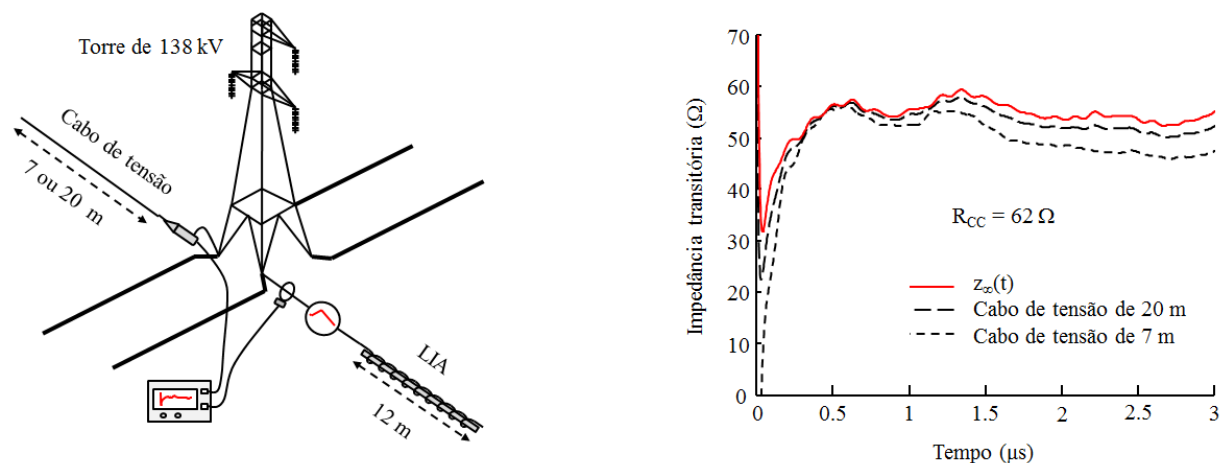


FIGURA 10 - Circuito de medição da impedância transitória de um pé de torre de 138 kV; resultados obtidos nas medições e os valores calculados para o $Z_{\infty}(t)$



FIGURA 11 – Fotografias do arranjo utilizado para a medição na torre de 138 kV experimental da UniverCemig

7.4 Análise dos resultados de medição

As ondas obtidas nas medições fornecem o valor da impedância transitória ao longo do tempo. Conforme (8), para a proteção de linhas de transmissão os valores da impedância da malha de aterramento medidos na faixa de 300 ns a 1,3 μs são os mais adequados para analisar o desempenho de uma linha de transmissão.

Para três dos quatro conjuntos de medição realizados, os valores das impedâncias transitórias, obtidos para tempos no entorno de 3 μs , são da ordem de grandeza dos valores das resistências medidos com um *megger*. No caso da LT 138 kV Jaboticatubas-Pedro Leopoldo 3 foi utilizada uma LIA de apenas 6 m e nesse caso a medição é válida até 1,5 μs (nesse tempo o valor da impedância transitória medida foi igual a 54% do valor medido com o *megger*).

Os resultados obtidos demonstram que a metodologia proposta pode ser utilizada para a medição da impedância transitória e também para a medição da resistência de aterramento.

As formas de onda obtidas nas simulações computacionais também se aproximam bastante das formas de onda medidas.

8.0 - CONCLUSÕES

Foram realizadas medições em dois campos de testes e também em uma linha real e a metodologia se mostrou de fácil aplicação e suficientemente precisa.

Em relação à prática atual de medição da resistência de aterramento, o novo procedimento, de ampla aplicação no setor elétrico, apresenta como vantagens a determinação direta da impedância de aterramento, a simplicidade de operação e menores riscos no processo de medição. Além disso, o procedimento novo dispensa a desconexão dos fios contrapesos ou cabo para-raios, faz uso de um arranjo otimizado de cabos de medição de pequeno comprimento (<20 m) e não demanda malhas de aterramento auxiliares.

O gerador e a metodologia de medição foram desenvolvidos no âmbito do projeto P&D ANEEL D270, tendo a CEMIG e a Universidade Federal de Minas Gerais como entidades parceiras, contando também com recursos advindos do CNPq e da FAPEMIG.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CHISHOLM, W. A. PETRACHE, E. Bologna, F. "Comparison of low frequency resistance and lightning impulse impedance on transmission towers," X International Symposium on Lightning Protection, 9 a 13 de novembro de 2009, Curitiba, Brasil.
- (2) AMETANI, A., CHIKARAA, T., MORII, H., KUBO, T. "Impedance characteristics of grounding electrodes on Earth surface." Electric Power Systems Research 85, p. 28-43, 2012.
- (3) HE, Jinliang, ZENG R., TU, Y., Jun Zou, CHEN, S., GUAN Z. "Laboratory Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Tower Grounding Devices." IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, July 2003.
- (4) ALÍPIO R., VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, volume 55, issue 1, pages 132-139,
- (5) MURAKAWA, K., YAMANE, H. "Earthing resistance measurement technique without using auxiliary electrodes." IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2003, p. 213 – 216, Vol.1.
- (6) GRCEV, L. Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, Issue 3, Part 1, Aug. 2009, p. 559 – 571.
- (7) LIMA, A.B., PAULINO, J.O.S., BOAVENTURA, W. C., GUIMARÃES, M. F. Transient Ground Impedance Measurement Using a Very Short Current Lead." 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, Brazil, October 7-11, 2013.
- (8) LIMA, A.B., PAULINO, J.O.S., BOAVENTURA, W. C., LOPES, I.J.S., LIMA, A.B., CHISHOLM, W. A. JAMAL, B., BOLOGNA, F. "Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead," Electric Power Systems Research, v. 118, p. 69-75, 2014.
- (9) CHISHOLM, W. A., PAULINO, J.O.S., BOAVENTURA, W. C., LOPES, I.J.S., LIMA, A.B., LIMA, A.B., BOLOGNA, F. "Simultaneous transient soil resistivity and footing impedance measurements using a very short current lead on 115kV and 138kV towers." International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects, Manaus, Brazil May, 2014.
- (10) IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Approved July 26, 1985. ISBN 471-85393-3.
- (11) BARBOSA, C. F., PAULINO, J.O.S., BOAVENTURA, W. C. "A time-domain method for the horizontal electric field calculation at the surface of two-layer Earth due to lightning." IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume 55, pp. 371-377, 2013.
- (12) COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Instrução para aterramento de estruturas de linhas de transmissão de 69 a 500 kV. 30.000-ER/LT-3368a, 2003.
- (13) PAULINO, J.O.S., BOAVENTURA, W. C., LIMA, A.B. "Desenvolvimento de um sistema para medição da impedância de aterramento de estruturas de linhas de transmissão utilizando ondas impulsivas," Relatório técnico Final. Convênio CEMIG D - FCO/UFMG. Projeto de P&D CEMIG D - ANEEL nº D270. Março de 2013.
- (14) CHISHOLM, W. A. et al. "Transient resistivity measurements on 345-kV transmission towers," 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), October 7–11, Belo Horizonte, Brazil, 2013.
- (15) LIMA, A.B., PAULINO, J.O.S., BOAVENTURA, W. C., GUIMARÃES, M. F. "A simplified method for calculating the tower grounding impedance by means of PSPICE." ICLP 2012 – 28th International Conference on Lightning Protection, 2-7 September, Vienna, Austria.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Maurisone Ferreira Guimarães (1976) é natural de Guanhães – MG; é engenheiro da CEMIG. Possui graduação (2001) e mestrado (2003), ambos em Engenharia Elétrica pela UFMG; possui MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas – FGV (2014). Maiores detalhes podem ser vistos em seu CV Lattes.

José Osvaldo Saldanha Paulino é professor da UFMG, possui graduação (1979) e mestrado (1985) pela UFMG e doutorado (1994) pela UNICAMP, todos em Engenharia Elétrica.

Wallace do Couto Boaventura é professor da UFMG, possui graduação (1988) e mestrado (1990) pela UFMG e doutorado (2002) pela UNICAMP, todos em Engenharia Elétrica.

Alexander Barros Lima é aluno de doutorado na UFMG, possui graduação (2007) na PUC-Minas e mestrado (2010) na UFMG, todos em Engenharia Elétrica.