

Avaliação Experimental de Tensões Induzidas nas Proximidades de Para-Raios de ZnO Submetido a Impulsos de Corrente Atmosférica

¹Valdemir S. Brito; ²Edson G. Costa; ²George R. S. Lira; ³Carlos J. A. Oliveira Filho; ⁴Marcelo J. A. Maia; ⁴Ronaldo S. Oliveira

¹Doutorando no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, PPGE/UFCG

¹Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, IFPB

²Professores do Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG

³Graduando em Engenharia Elétrica, UFCG

⁴Engenheiros Eletricistas da Companhia Hidroelétrica do São Francisco, CHESF

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)

Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF)

valdemir.brito@ee.ufcg.edu.br

Resumo—Neste trabalho são avaliadas as tensões induzidas nas proximidades do para-raios de óxido de zinco (ZnO) de distribuição quando submetido a impulsos de corrente atmosférica padronizado, com forma de onda 8/20 μ s e amplitude de 10 kA. Os ensaios foram realizados em laboratório. Para isto, foi utilizado um gerador de impulsos de corrente. No momento de aplicação dos impulsos de corrente foram registradas, através de um osciloscópio digital, as formas de onda do impulso de corrente, da tensão residual no para-raios e da tensão induzida em pontos próximos ao para-raios, com distâncias entre 10 cm e 2 m do ponto de injeção de corrente. Os resultados de medição evidenciaram tensões induzidas significativas nas proximidades do para-raios, de cerca de 20% da tensão residual para a distância de 10 cm. Elevados valores de tensão induzida podem conduzir a erros de medição, falhas de equipamentos e risco de morte para pessoas e animais.

Palavras-chave – acoplamento magnético; descarga atmosférica; óxido de zinco; para-raios; tensão induzida.

I. INTRODUÇÃO

A descarga atmosférica é um fenômeno preocupante para o sistema elétrico de potência, pois seus efeitos podem conduzir a danos em equipamentos e pôr em risco a vida de pessoas e animais. De acordo com [1], no Brasil, estima-se que a incidência de descargas causem anualmente a morte de mais de uma centena de pessoas e perdas econômicas de centenas de milhões de dólares.

De acordo com o Grupo de Eletricidade Atmosférica - ELAT [2] do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, o Brasil é o país campeão mundial em incidência de raios. No Brasil, caem cerca de 50 milhões de raios por ano. Segundo o ELAT, isso deve-se a posição geográfica do Brasil: é o maior país da zona tropical do planeta - área central onde o clima é mais quente e, portanto, mais favorável à formação de tempestades e de raios.

O fenômeno físico e os efeitos da descarga atmosférica são temas complexos, não completamente compreendidos, e por isso ainda muito estudados por pesquisadores em todo o mundo. Sabe-se, porém, que as descargas atmosféricas possuem formas de onda impulsivas de curta duração, na ordem de dezenas de microssegundos, e amplitudes que podem atingir dezenas de kiloampères. As formas de onda e amplitude dependem das características elétricas do material atingido pela descarga.

As descargas atmosféricas podem incidir direta ou indiretamente no sistema elétrico. Quando atingem linhas de transmissão e distribuição ou equipamentos elétricos (descarga direta) os elevados valores de amplitude das descargas de corrente podem resultar em níveis de sobretensões superiores ao Nível Básico de Isolamento (NBI) dos equipamentos conectados à linha, conduzindo a falha desses equipamentos, o que pode acarretar na interrupção do fornecimento de energia elétrica. Quando as descargas incidem próximas as linhas de transmissão e distribuição ou próximas aos equipamentos elétricos (descarga indireta), o campo eletromagnético gerado pode resultar em tensões induzidas no sistema elétrico superiores ao NBI dos equipamentos. As descargas indiretas são mais prejudiciais aos sistemas de distribuição, devido aos níveis mais baixos de NBI. Além disso, há uma maior ocorrência desse tipo de descarga [3].

Na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões atmosféricas são comumente utilizados supressores de surto, sendo o para-raios de óxido de zinco (ZnO) o mais utilizado atualmente. Eles atuam como limitadores de tensão, impedindo que sobretensões com valores acima de um determinado nível pré-estabelecido possam atingir os equipamentos a serem protegidos [4], [5].

Diversos trabalhos na literatura [6]–[11] relatam que a curta duração e os elevados valores de amplitude das descargas

de corrente conduzidas pelos para-raios de ZnO geram campos magnéticos intensos nas suas proximidades, responsáveis pelo surgimento de uma tensão induzida que é adicionada à verdadeira tensão residual medida em para-raios de ZnO. A adicional tensão induzida pode resultar em significativos erros de medição, e consequentemente, erros no fornecimento dos dados do para-raios pelos fabricantes em seus *datasheets*, o que acarretará em uma incorreta especificação. Este trabalho visa contribuir com a avaliação dos níveis das tensões induzidas nas proximidades dos para-raios de ZnO de distribuição, quando submetidos a descargas atmosféricas padrão - 8/20 μ s, geradas em laboratório, com amplitudes de aproximadamente 10 kA.

II. GERAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LABORATÓRIO

Devido aos problemas envolvendo os efeitos das descargas de corrente atmosférica no sistema elétrico e em pessoas e animais, muitos pesquisadores estudaram as características elétricas dessas descargas. A partir de estudos foi definida a forma de onda típica de impulso de corrente atmosférica que poderia ser reproduzida em laboratório. Essa forma de onda está definida em normas [12], [13]. Na Fig. 1 é mostrada a forma de onda típica de um impulso de corrente.

Na Fig. 1, tem-se que T_1 representa o tempo de frente virtual, o qual é definido como sendo 1,25 vezes o intervalo de tempo, T , entre os instantes nos quais o impulso está com 10% (ponto C) e 90% (ponto B) de sua amplitude máxima. A origem virtual, O_1 , é o ponto definido pela intersecção da reta que passa pelos pontos B e C com o eixo horizontal. O tempo de meia cauda, T_2 , corresponde ao intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a cauda do impulso atinge 50% do seu pico. Dessa forma, quando se diz que um impulso de corrente tem forma de onda 8/20 μ s, significa que este impulso possui um tempo de frente virtual de 8 μ s e um tempo de meia cauda de 20 μ s. Devido às dificuldades da geração do impulso de corrente com valores exatos de tempos de frente, meia cauda e amplitude, são admitidas tolerâncias de $\pm 10\%$ para cada um dos três parâmetros [12], [13].

O circuito do gerador de impulso de corrente é geralmente constituído por elementos *RLC* (resistor, indutor e capacitor) conectados em série. O capacitor C é o principal elemento, utilizado para armazenar as cargas que constituirão o impulso de corrente.

Na Fig. 2 é mostrado o circuito simplificado de um gerador de impulso de corrente. *SG* é o *spark gap* (centelhador), utilizado como gatilho para início da descarga. U_c é o valor da tensão de carregamento dos capacitores. R , L e C , são, respectivamente, as resistências, indutâncias e capacitâncias equivalentes do circuito. As características elétricas (R , L e C) do objeto de teste influenciam a forma de onda e amplitude do impulso de corrente gerado, e por isso devem ser consideradas [14].

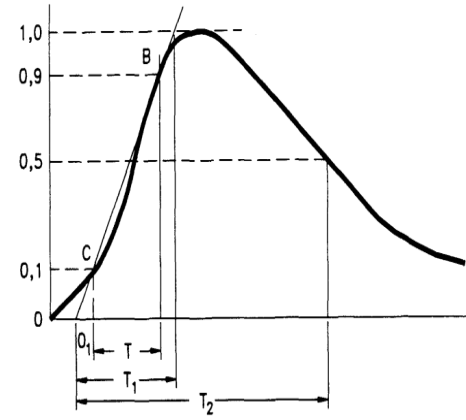


Fig. 1. Impulso de corrente típico [13].

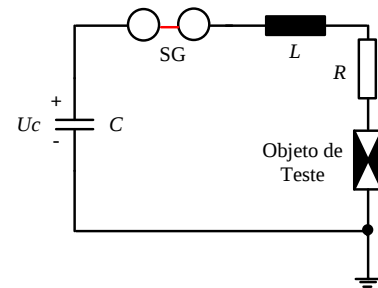


Fig. 2. Circuito simplificado do gerador de impulso de corrente.

III. TENSÃO INDUZIDA

O fenômeno da tensão induzida envolvendo descargas atmosféricas é complexo e muitos fatores influenciam em sua amplitude e forma de onda. De acordo com [1], no acoplamento eletromagnético entre descarga de corrente e linha de transmissão, por exemplo, existem quatro mecanismos de acoplamento envolvendo os campos elétricos e magnéticos. Há dois tipos de acoplamento elétrico, um de natureza capacitiva e outro de natureza resistiva, sendo que no ar atmosférico, o efeito capacitivo é predominante. Devido ao intenso fluxo de corrente há o estabelecimento de um campo magnético induzido, cujas linhas enlaçam os percursos fechados pela linha de transmissão e a superfície do solo. De acordo com a Lei de Faraday-Lenz, na sua forma integral, a variação do fluxo magnético no tempo é responsável pelo surgimento de uma força eletromotriz induzida (f_{em}), conforme relação apresentada na Eq. 1. Além disso, a variação muito rápida de corrente determina um efeito de irradiação, associado à propagação de uma onda eletromagnética a partir do canal de descarga, que também é responsável pela indução de tensão, assim como no processo anterior. As características do fenômeno solicitante, no caso em análise, é que determina a importância relativa de cada mecanismo e a eventual prevalência de um deles [1].

$$f_{em} = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot dA. \quad (1)$$

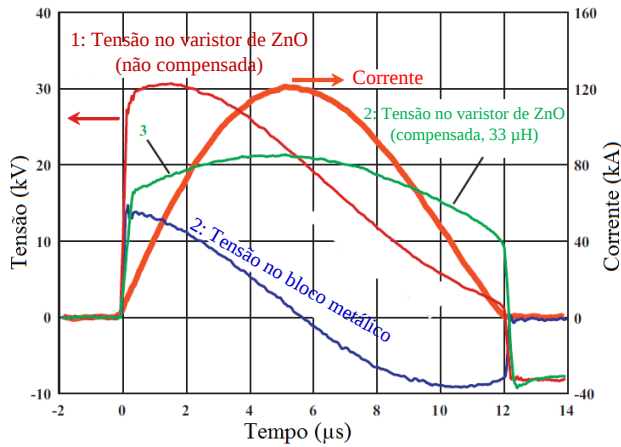


Fig. 3. Medições de tensões residuais com e sem compensação [11].

Em 2011, Metwally [11] realizou experimentos em laboratório com objetivo de compensar o acoplamento magnético entre o equipamento de medição da tensão residual e o varistor de ZnO. No experimento ele utilizou um bloco metálico para compensação, em conformidade com [15]. Também foi utilizada uma bobina com núcleo de ar como elemento de compensação do acoplamento magnético. Na Fig. 3 são mostrados os resultados do experimento. Nota-se uma significativa diferença na forma de onda e amplitude da tensão medida no varistor de ZnO com e sem compensação.

Atualmente, devido às dificuldades de reprodução das descargas atmosféricas no sistema elétrico real, como também as dificuldades de medição, com precisão, dos campos elétricos e magnéticos induzidos, as pesquisas têm concentrado esforços no desenvolvimento de modelos computacionais de acoplamento [16]–[21] para o cálculo da tensão induzida. Apesar das diversas formas de acoplamento induzido, de acordo com [1], para distâncias inferiores a 1 km, avaliações quantitativas relativamente simples permitem verificar a predominância do campo magnético induzido no efeito do acoplamento.

IV. TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram realizados com o gerador de impulso de corrente existente no laboratório de alta tensão da UFCG. O gerador possui oito estágios, em que cada estágio é formado por um capacitor de capacitância $1,96 \mu\text{F}$ (100 kV) em série com um resistor. Os estágios podem ser interligados em paralelo, de forma a aumentar a energia liberada no impulso de corrente. Uma fonte de alimentação alternada com tensão regulável entre 0 e 220 V, acoplada a um transformador de alta tensão, é capaz de elevar a tensão de pico do secundário até 100 kV. A função da fonte de alimentação é carregar os capacitores. A tensão de carregamento é ajustada na mesa de controle do gerador.

O gerador pode ser representado pelo circuito visualizado na Fig. 4(a). A capacitância e resistência equivalente é dada em função dos valores de R e C e da quantidade de estágios RC conectados em paralelo. A medição da corrente no objeto

de teste é realizada de forma indireta, medindo-se a tensão nos terminais do resistor R_{shunt} .

Na Fig. 4(b) é mostrada a fotografia dos elementos RLC do circuito, do para-raios de distribuição e equipamentos de medição de tensão (divisor de tensão e ponta de prova de alta tensão).

Como objeto de teste, foi utilizado um para-raios de ZnO de distribuição, com revestimento polimérico, tensão nominal de 12 kV e máxima tensão de operação contínua (MCOV) de 10,2 kV. O para-raios foi submetido a impulsos de corrente atmosférica, com forma de onda 8/20 μs e amplitude de aproximadamente 10 kA. Para medição da tensão residual foi utilizado um divisor de alta tensão capacitivo e para medição da tensão induzida, uma ponta de prova de alta tensão. Inicialmente, a ponta de prova de alta tensão foi colocada a uma distância de 10 cm do lado direito do para-raios e em seguida dois impulsos de corrente foram aplicados ao para-raios, tendo as formas de onda do impulso de corrente, tensão no para-raios e tensão induzida registradas em um osciloscópio digital. O mesmo procedimento foi realizado para a distância de 20 cm do lado direito, 10 e 20 cm do lado esquerdo, 1 e 2 m de distância.

Nas Fig. 5(a) e 5(b) são visualizadas fotografias da ponta de prova de alta tensão posicionada a uma distância de 10 cm e 1 m do para-raios, respectivamente.

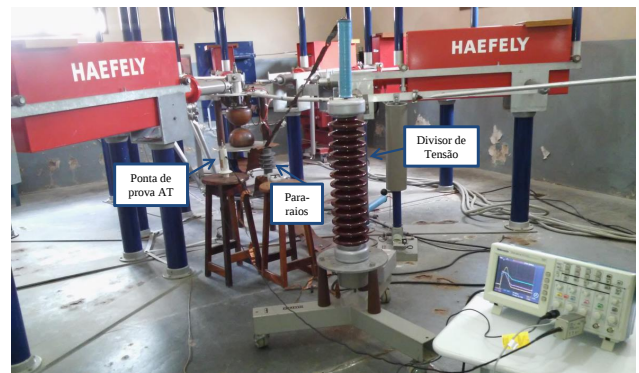
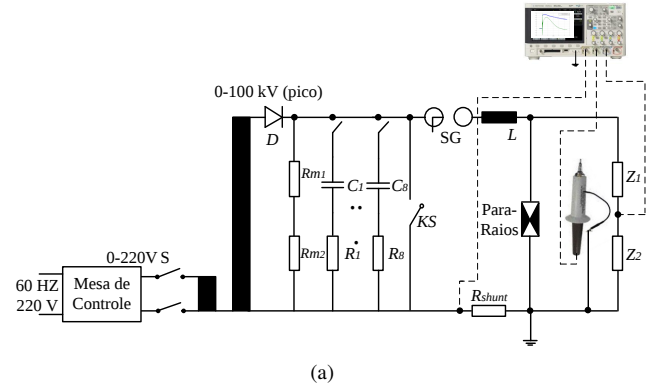
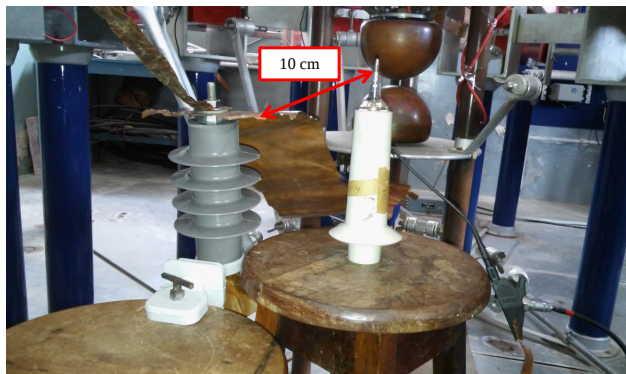
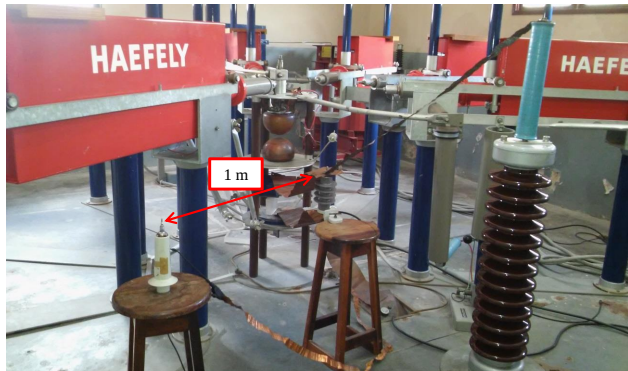


Fig. 4. Gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG. (a) Diagrama esquemático do circuito do gerador de impulso de corrente e arranjo de medição. (b) Fotografia do gerador de impulso de corrente e arranjo de medição.



(a)



(b)

Fig. 5. Fotografias mostrando o afastamento da ponta de prova de alta tensão em relação ao para-raios. Distância de: (a) 10 cm. (b) 1 m.

V. RESULTADOS E ANÁLISES

Após a realização dos ensaios foi iniciado o tratamento dos dados. As formas de onda dos dois impulsos de corrente aplicados ao para-raios e as respectivas tensões residuais e induzidas, para cada uma das diferentes distâncias de afastamento da ponta de prova de alta tensão, foram filtradas utilizando o filtro média móvel. O objetivo da utilização do filtro é a eliminação do ruído presente nos sinais, inerente ao processo de aquisição. Em seguida, a forma de onda média foi calculada.

As Fig. 6(a) a 6(f) apresentam o comportamento médio das formas de onda do impulso de corrente, tensão residual no para-raios e tensão induzida, para cada uma das diferentes distâncias de afastamento da ponta de prova. Nota-se, como esperado, que há uma diminuição da tensão induzida à medida que a ponta de prova é afastada do para-raios. Além disso, observa-se nas Fig. 6(a) a 6(f) que a tensão induzida possui distribuição praticamente uniforme, visto que ela decresce proporcionalmente à distância e os valores das tensões induzidas nos dois lados do para-raios, para uma mesma distância, possuem pouca variação. As pequenas diferenças podem ser atribuídas a variações nos valores de pico da corrente, imprecisão na medição da distância e desvio de simetria no posicionamento da ponta de prova.

Na Tabela I são apresentados os valores de pico do impulso de corrente atmosférico, do valor de pico da tensão induzida, tensão residual e o percentual da tensão induzida em relação à tensão residual. Para a distância de 10 cm o valor de pico da tensão induzida está compreendido entre 21 e 22% da tensão residual, que no caso do para-raios de distribuição em análise, corresponde a um valor entre 6,2 e 6,7 kV. Conforme apresentado na seção inicial, com base em uma série de trabalhos acadêmicos, é possível que essa tensão induzida seja adicionada à medição da verdadeira tensão residual do para-raios de ZnO, e dessa forma ocorra erros de medição, o que resultará na incorreta especificação do para-raios. Além disso, no sistema elétrico de distribuição, devido aos baixos valores de NBI comparado ao sistema de transmissão, poderá ocorrer a falha de equipamentos e instalações desse sistema. No caso do para-raios de distribuição, especificamente, na grande maioria das vezes, eles estão posicionados muito próximos ao transformador, conectados a um suporte preso ao tanque, e sendo assim, na ocorrência de uma descarga atmosférica, um significativo valor de tensão induzida será adicionado aos terminais de alta tensão do transformador.

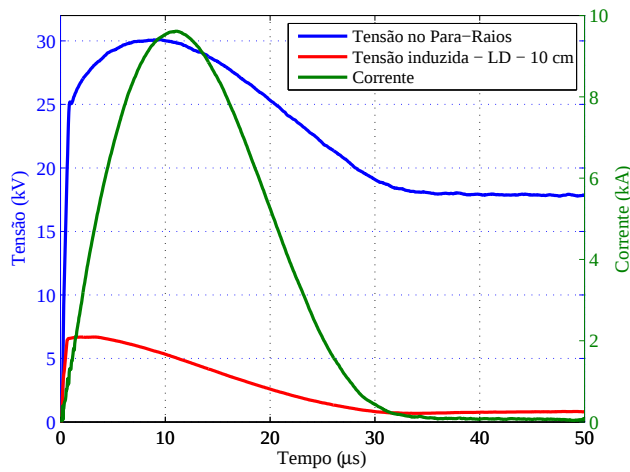
Nos experimentos, verificou-se que mesmo para distâncias maiores, de 1 e 2 m, a tensão induzida proporcionada por descargas atmosféricas em linhas de distribuição protegidas por para-raios de ZnO apresentam valores que oferecem risco de morte a profissionais que trabalham na manutenção do sistema de distribuição e que estejam próximos a esses para-raios.

Embora a descarga atmosférica possa provocar diversos tipos de acoplamentos eletromagnéticos, é possível concluir a partir das Fig. 6(a) a 6(d) que para distâncias pequenas em relação ao ponto de injeção de corrente, no caso em análise de 10 e 20 cm, há uma predominância da tensão induzida devido ao acoplamento magnético. Essa afirmação deve-se ao fato de que os picos das tensões induzidas para essas distâncias estão bastante adiantados dos picos das correntes, caracterizando a predominância da componente indutiva. Já para as distâncias de 1 e 2 m, observa-se uma diminuição do atraso da corrente em relação à tensão, possivelmente devido à contribuição de outras componentes, como por exemplo do acoplamento elétrico de natureza capacitiva.

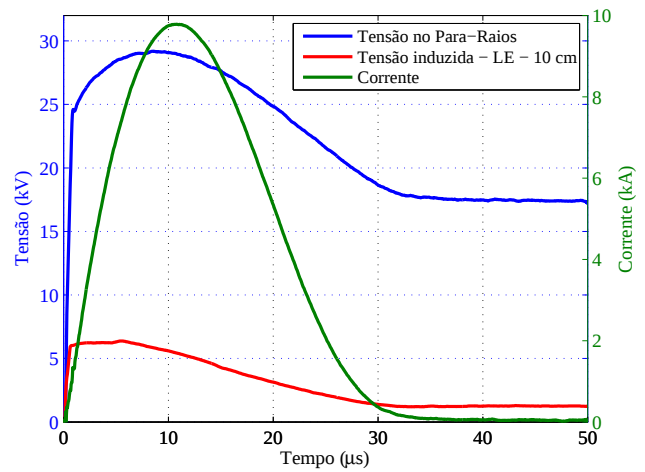
Tabela I
PARÂMETROS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO INDUZIDA

Posição - Ponta AT	I_{pico} (kA)	TR (kV)	TI (kV)	$\frac{TI}{TR} \times 100$ (%)
LD - 10 cm	9,61	30,11	6,68	22,18
LE - 10 cm	9,78	29,20	6,27	21,47
LD - 20 cm	9,62	30,30	4,39	14,49
LE - 20 cm	9,46	29,41	3,71	12,61
1 m	9,75	30,31	0,95	3,13
2 m	9,48	30,61	0,53	1,73

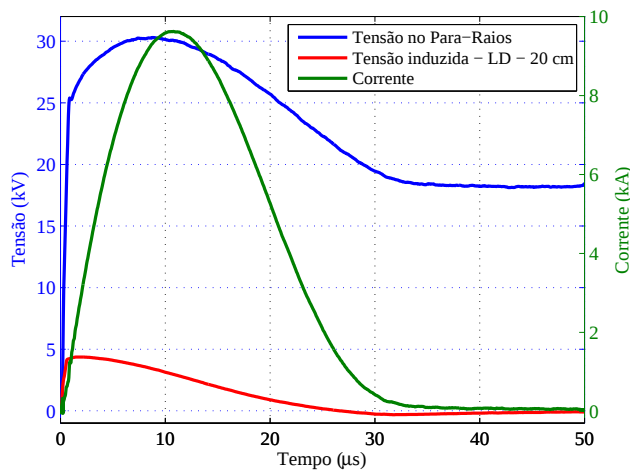
Legenda: TR - Tensão Residual; TI - Tensão Induzida.



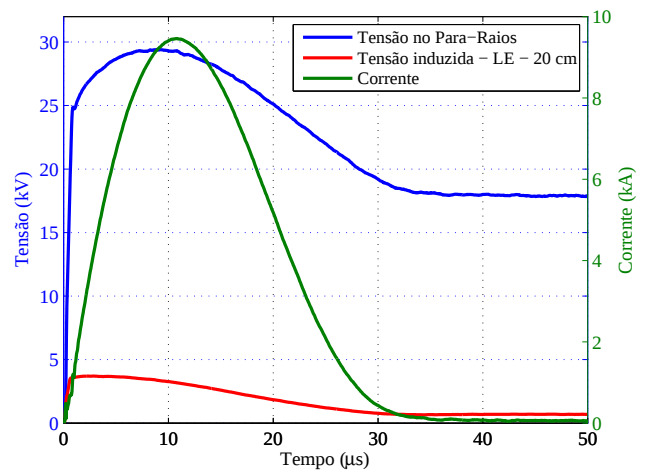
(a)



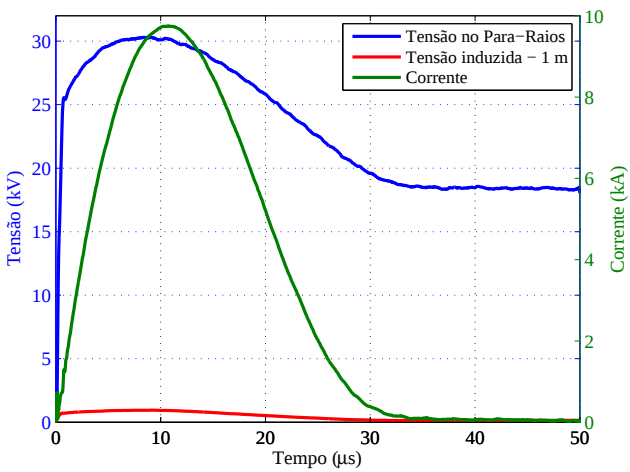
(b)



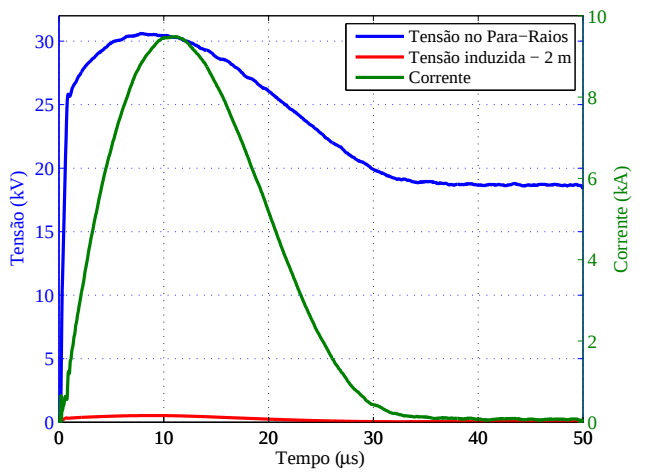
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 6. Tensões e correntes medidas no para-raios de distribuição e em suas proximidades. Tensões induzidas medidas no: (a) Lado direito - 10 cm; (b) Lado esquerdo - 10 cm; (c) Lado direito - 20 cm; (d) Lado esquerdo - 20 cm; (e) 1 m; (f) 2 m.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas tensões induzidas nas proximidades do para-raios de ZnO de distribuição quando submetido a impulsos de corrente atmosférica. Foram constatados significativos valores de tensões induzidas nas proximidades do para-raios. Para uma distância de 10 cm do ponto de injeção da descarga de corrente, mediu-se um pico de tensão de cerca de 21 a 22% da tensão residual medida no para-raios.

Os significativos valores de tensões induzidas nas proximidades dos para-raios de distribuição podem conduzir a sua falha ou dos equipamentos que ele está a proteger. Isto porque com a adição da tensão induzida o NBI dos equipamentos pode ser superado. Devido à proximidade com o para-raios, o transformador de distribuição apresenta um potencial risco de falha.

A análise dos resultados de medição evidencia a predominância da tensão induzida devido ao acoplamento magnético para regiões próximas ao para-raios, e que à medida que se distancia do ponto de injeção da descarga de corrente há uma menor contribuição desse acoplamento e da amplitude da tensão induzida.

Os elevados valores de tensões induzidas medidos nas proximidades dos para-raios de ZnO alerta para a necessidade de considerar a presença do acoplamento indutivo na medição da tensão residual. Dessa forma, incentiva a busca de procedimentos que minimizem ou compensem o acoplamento indutivo, de modo a obter o real comportamento elétrico do para-raios de ZnO.

REFERÊNCIAS

- [1] S. V. F., *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. Artliber, 2005.
- [2] ELAT/INPE, *Grupo de Eletricidade Atmosférica*, 2015 (acessado em 23 de outubro de 2015). [Online]. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/perguntas.e.respostas.php>
- [3] A. S. Neto, "Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Redes de Distribuição," Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [4] V. S. Brito, G. R. S. Lira, E. G. Costa, and G. J. C. Almeida, "Estudo comparativo de métodos de decomposição da corrente de fuga total em para-raios de óxido de zinco." Goiânia - Brasil: ANAIS DO IV SBSE — Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.
- [5] V. S. Brito, G. R. S. Lira, E. G. Costa, G. J. C. Almeida, R. A. Dias, and M. J. A. Maia, "Validação do Método da Estimção da Capacitância Utilizado na Decomposição da Corrente de Fuga em Para-Raios de ZnO." Foz do Iguaçu - Brasil: ANAIS DO V SBSE — Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2014.
- [6] C. Dang, T. Parnell, and P. Price, "The response of metal oxide surge arresters to steep fronted current impulses," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 1, pp. 157–163, 1986.
- [7] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl, and D. Qui, "Behaviour of mo - surge arrester blocks to fast transients," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 4, no. 1, pp. 292–300, 1989.
- [8] A. Haddad, P. Naylor, D. German, and R. Waters, "A fast transient test module for zno surge arresters," *Measurement Science and Technology*, vol. 6, no. 5, p. 560, 1995.
- [9] ABDUL MALEK, Z. B., "Development of a Non-Inductive High Voltage D-Dot Probe Voltage Transducer System." in *University Technology Malaysia*, 2003.
- [10] I. A. Metwally, "D-dot probe for fast-front high-voltage measurement," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 8, pp. 2211–2219, 2010.
- [11] —, "Comparative measurement of surge arrester residual voltages by d-dot probes and dividers," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1274–1282, 2011.
- [12] IEC, "High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements," Tech. Rep., 1989.
- [13] IEEE, "Ieee standard techniques for high-voltage testing," IEEE, Tech. Rep., 1995.
- [14] V. S. Brito, G. R. S. Lira, E. G. Costa, R. B. Nóbrega, and M. J. A. Maia, "Simulations and tests with impulse current generator." Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering, 2015.
- [15] IEC, "IEC 60099-4 Surge arresters—Part 4: Metal-oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems," Tech. Rep., 2001.
- [16] S. Rusck, "Induced-lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks," *Trans. of Royal Institute of Technology*, 1958.
- [17] A. K. Agrawal, H. J. Price, and S. H. Gurbaxani, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, no. 2, pp. 119–129, 1980.
- [18] S. Visacro and A. Soares, "Hem: A model for simulation of lightning-related engineering problems," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1206–1208, 2005.
- [19] P. C. A. Mota, M. L. R. Chaves, and J. R. Camacho, "Tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão." Foz do Iguaçu - Brasil: ANAIS DO V SBSE — Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2014.
- [20] J. O. S. Paulino, P. C. Assuncao, and C. F. Barbosa, "Lightning induced voltages in large loops," in *Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015 International Symposium on*. IEEE, 2015, pp. 47–53.
- [21] T. H. Thang, Y. Baba, V. A. Rakov, and A. Piantini, "Fddt computation of lightning-induced voltages on multiconductor lines with surge arresters and pole transformers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 3, pp. 442–447, June 2015.