

# Avaliação do Desempenho de Modelos de Para-raios a ZnO Frente a Descargas Atmosféricas

George R. S. Lira, Luiz A. M. M. Nobrega, Luana V. Gomes, Edson G. da Costa, Marcelo J. A. Maia

**Resumo-** Neste trabalho, é avaliado o desempenho de alguns modelos de para-raios a ZnO em função das descargas atmosféricas que atingem o sistema elétrico. Nas simulações do sistema elétrico, foram usados dados reais do sistema de uma concessionária local, para a aplicação de descargas atmosféricas com forma de onda 8/20  $\mu$ s e 1/2  $\mu$ s. O arranjo de ligações do para-raios ao sistema foi um dos parâmetros considerados durante as simulações. Os modelos de para-raios avaliados apresentaram resultados semelhantes quando ao sistema foram aplicadas descargas de 8/20  $\mu$ s. No entanto, para os surtos 1/2  $\mu$ s ocorreram diferenças significativas nos resultados, principalmente entre os modelos Cigré, IEEE e Pinceti em relação ao modelo Convencional.

**Palavras Chaves** — Descarga Atmosférica, Modelo de para-raios a ZnO, Transitórios eletromagnéticos.

## I. INTRODUÇÃO

Os equipamentos de um sistema elétrico de potência com tensão inferior a 300 kV, são vulneráveis as descargas atmosféricas. Em determinadas condições estas descargas ocasionam a queima de equipamentos ou a perda de continuidade do serviço. Para a proteção do sistema torna-se necessário a instalação de dispositivos de proteção, sendo os para-raios os equipamentos mais adequados, visto que os mesmos atuam como limitadores de tensão, impedindo que valores acima de um determinado nível pré-estabelecido possam atingir os equipamentos a serem protegidos.

Dada a importância do fornecimento ininterrupto de energia e ao grande valor financeiro associado a queima dos equipamentos presentes no sistema elétrico, é imprescindível investir no desenvolvimento de um estudo detalhado do impacto de descargas atmosféricas em sistemas de energia elétrica, buscando uma perfeita adequação dos níveis básicos de isolamentos dos equipamentos. Normalmente, um estudo dessa magnitude envolve intensos cálculos matemáticos e tem sido realizado com auxílio de programas computacionais que trabalham no domínio do tempo, como o ATP (*Alternative Transient Program*).

As análises do desempenho dos sistemas elétricos frente às

descargas atmosféricas podem se iniciar pela modelagem adequada de cada equipamento, considerando os aspectos transitórios inerentes ao fenômeno. No decorrer dos anos vem sendo propostos vários modelos que buscam descrever o comportamento dos para-raios para diversos tipos de solicitações [1]-[9]. Através de simulações de transitórios eletromagnéticos, serão avaliados o desempenho de alguns modelos de para-raios a Óxido de Zinco (ZnO) em função das descargas atmosféricas que atingem o sistema elétrico. Nas simulações desse sistema, serão usados dados reais, na qual se elegeu uma parte do sistema da concessionária local para a aplicação das descargas atmosféricas. Descargas com forma de onda 8/20  $\mu$ s e 1/2  $\mu$ s foram aplicados no sistema em estudo. Assim, neste trabalho serão avaliados os efeitos de dois parâmetros (dependência da frequência e da indutância do arranjo de ligações) nos níveis da tensão residual dos para-raios.

## II. CARACTERÍSTICAS DO PARA-RAIOS A ZNO

Os para-raios de óxido zinco (ZnO) ou supressores de surtos são constituídos basicamente por um conjunto de pastilhas a base de ZnO (varistores), também denominados de resistências não-lineares, dispostas em uma ou mais colunas.

As principais características do para-raios a ZnO são a não-linearidade em relação à curva tensão-corrente (V-I), uma alta capacidade de absorção de energia e uma forte dependência com a temperatura [10]-[11].

Além dessas características, os para-raios a ZnO apresentam uma característica dinâmica dependente da frequência, que só é observada durante surtos de corrente com frentes de onda rápidas (tempo de crista inferior a 8  $\mu$ s) [5].

Medições mostram que a tensão residual do para-raios para uma dada amplitude de corrente de descarga aumenta de 6% a 12% à medida que o tempo de crista da corrente diminui de 8  $\mu$ s para 1,3  $\mu$ s [5]. Então, conclui-se que a tensão sobre o varistor não é somente função da amplitude da descarga, mas também do tempo de frente do impulso de corrente.

## III. MODELOS DE PARA-RAIOS DE ZNO

Nesta seção será feita uma apresentação sobre os modelos de para-raios a ZnO empregados nas simulações digitais.

### A. Modelo Convencional

O modelo convencional ou modelo do resistor não-linear representa a característica V-Ido para-raios a ZnO através de um resistor não-linear composto por vários segmentos, no qual cada segmento pode ser aproximado por retas ou por (1) [2].

Este trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil.

G. R. S. Lira, L. A. M. M. Nobrega, L. V. Gomes, E. G. da Costa fazem parte dos laboratórios de Alta tensão – LAT, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. (e-mail: george@dee.ufcg.edu.br, luiz.nobrega@ee.ufcg.edu.br, luana.gomes@ee.ufcg.edu.br, edson@dee.ufcg.edu.br).

M. J. A. Maia faz parte da Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF. (e-mail: mjamaia@chesf.gov.br).

$$i = p \left( \frac{v}{V_{ref}} \right)^q. \quad (1)$$

Os parâmetros  $i$  e  $v$  são a corrente e a tensão no para-raios, respectivamente,  $q$  é o expoente,  $p$  o multiplicador para cada segmento e  $V_{ref}$  é uma tensão de referência arbitrária que normaliza a equação e previne problemas de representação numérica (“overflow”) durante a potenciação.

Apesar de o modelo representar a característica não-linear do para-raios de forma satisfatória, ele não é capaz de representar a característica dinâmica do mesmo [12]. A Fig. 1 ilustra o modelo convencional, o qual se constitui apenas por uma resistência não-linear.

### B. Modelo Proposto pelo IEEE

Este modelo foi proposto pelo grupo de trabalho do IEEE (denominado *IEEE Working Group 3.4.11*) que propôs o circuito apresentado na Fig. 2 como um modelo de referência [5].

No modelo do IEEE, a característica não-linear do para-raios é representada por duas resistências não-lineares A0 e A1, que são definidas através das curvas mostradas na Fig. 3, de modo que a tensão de base é a tensão residual do para-raios. As resistências A0 e A1 são separadas por um filtro R-L, conforme pode ser visto na Fig. 2. Para surtos lentos, o filtro R-L possui uma impedância muito pequena, deixando A0 e A1 praticamente em paralelo. Para surtos rápidos, a impedância do filtro R-L torna-se mais elevada, consequentemente, a corrente em A0 aumenta, assim como a tensão. Dessa forma, representa-se a característica dinâmica do para-raios (elevação da tensão em função do tempo de frente da corrente). O elemento L0 representa a indutância associada com o campo magnético do para-raios. A resistência R0 é usada para evitar instabilidades numéricas e a capacitância C representa a capacitância terminal-terminal do para-raios.

### C. Modelo Proposto por Pinceti

O modelo do Pinceti [7] é uma simplificação do Modelo do IEEE WG 3.4.11. O modelo simplificado é mostrado na Fig. 4 e apresenta as seguintes modificações: a capacitância foi eliminada, uma vez que os autores consideraram que seus efeitos sobre o comportamento do modelo é desprezível, e as duas resistências em paralelo com as indutâncias foram substituídas por uma resistência R, de aproximadamente 10MΩ, entre os terminais de entrada com a finalidade de evitar problemas numéricos.

### D. Modelo Proposto pelo Cigré

O modelo proposto pelo CIGRE Working Group apresentado em [8] é uma simplificação do modelo proposto por [3]. O circuito equivalente foi reduzido a uma combinação em série de uma resistência linear, uma resistência não-linear e uma indutância linear, como ilustrado na Fig. 5.

## IV. SIMULAÇÕES DIGITAIS

Para avaliar os modelos de para-raios a ZnO, simulou-se, no ATP, o sistema representado na Fig. 6. Nas simulações foram considerados todos os equipamentos presentes no sistema,

como transformadores, reatores, linhas de transmissão (LT), cargas equivalentes, etc. Os para-raios existentes no sistema foram simulados através dos modelos descritos anteriormente.

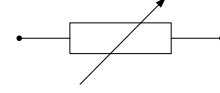


Fig. 1. Resistência não-linear (Modelo Convencional).

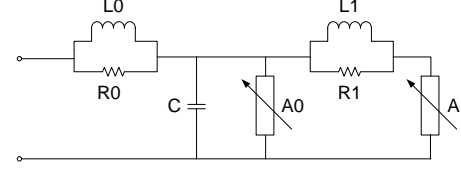


Fig. 2. Modelo do IEEE.

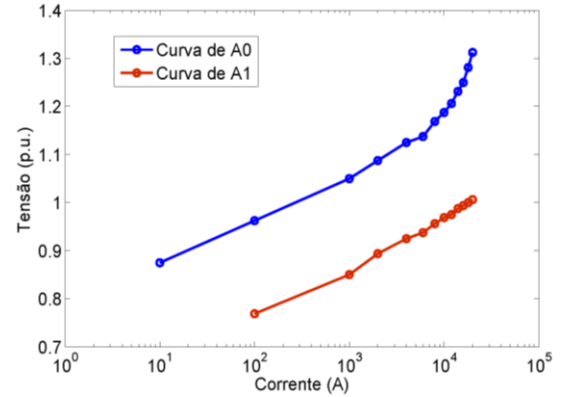


Fig. 3. Características dos elementos não-lineares A0 e A1 proposto pelo IEEE [5].

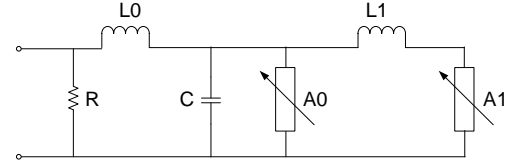


Fig. 4. Modelo do Pinceti.

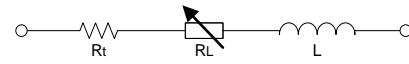


Fig. 5. Modelo do Cigré.

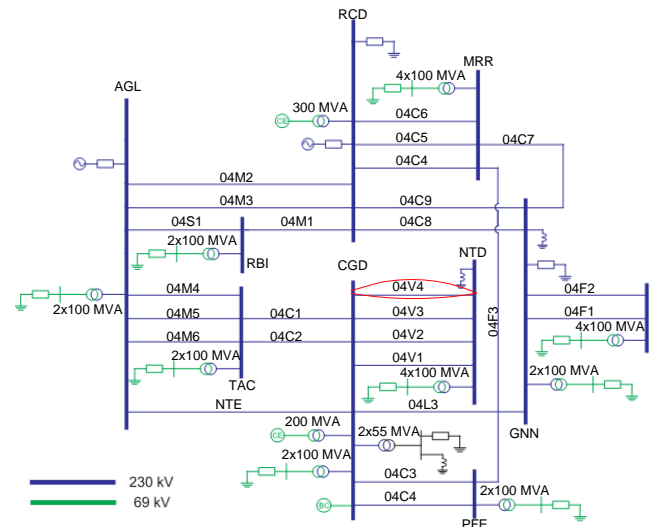


Fig. 6. Sistema de energia elétrica avaliado.

Para a modelagem dos para-raios utilizou-se as características de um para-raios comercial, incluindo sua curva característica V-I e os demais dados fornecidos no *datasheet* do fabricante [13], [14]. Na Tabela I são mostrados os principais dados do para-raios utilizado. Na Fig. 7 podem ser visualizadas as características V-I dos para-raios para surtos atmosféricos e íngremes.

TABELA I  
DADOS DO PARA-RAIOS

Tensão Nominal	MCOV <sup>a</sup>	Tensão Residual para impulso de corrente 10 kA- 8/20 µs	Altura
192 kV	154 kV	452 kVpico	2,585 m

a. Máxima Tensão de Operação Contínua.

As características não lineares dos modelos de para-raios foram representadas no ATP pelo *branchcard* Tipo-92. Nas linhas de transmissão (LT) cada fase modelada tem os seus próprios para-raios. Portanto, uma LT tem seis para-raios, três equipamentos em cada barra.

Neste trabalho, as linhas de transmissão foram modeladas usando o modelo de parâmetros constantes distribuídos. Tal modelo é muito utilizado em simulações digitais de sistemas elétricos de potência devido, principalmente, à sua precisão. Os dados utilizados na representação das linhas de transmissão foram obtidos na concessionária local.

As descargas atmosféricas foram representadas por uma fonte de corrente com polaridade positiva. Dentre as opções de fontes disponibilizadas pelo ATP, utilizou-se a fonte Heidler [15], definida por:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{(t/\tau_1)^n + 1} \cdot e^{-(t/\tau_2)}, \quad (2)$$

onde:

$$\eta = e^{-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{1/n}}, \quad (3)$$

e:

$I_0$  = valor de pico da corrente;

$\tau_1$  = constante de tempo que determina o tempo de subida;

$\tau_2$  = constante de tempo que determina o tempo de descida;

$n$  = fator de inclinação da corrente.

A fonte Heidler foi ajustada para modelar descargas atmosféricas de 10 kA com forma de onda 8/20 µs e de frente rápida (1/2 µs) (como mostrado na Fig. 8). Estes tipos de descargas são empregados em estudos de sistemas de energia elétrica para avaliar o comportamento do sistema contra transitórios rápidos e muito rápidos.

Nas simulações, as descargas atmosféricas foram aplicadas em três diferentes pontos da linha 04V4 do sistema de elétrico avaliado (ver Fig.6): na barra CGD, no centro da linha 04V4 e na barra NTD. O procedimento de teste está representado na Fig. 9.

A resposta do sistema foi avaliada em cada barra (CGD, centro da linha, NTD) para três situações diferentes. Primeiramente, simulou-se o sistema sem a presença de para-raios. Para o segundo caso considerou-se a presença de para-raios conectados à linha de teste (04V4), mas desprezou-se a existência do arranjo de ligação dos mesmos. Por fim, adotou-se que o sistema possuía para-raios conectados à linha de teste

e considerou-se a presença do arranjo de ligações dos mesmos. O arranjo de ligações consiste nos cabos de conexão entre o para-raios e a linha, entre a base do para-raios e a terra, e entre o para-raios e o transformador, no qual o comprimento dos cabos foram estimados como sendo 4; 2,5 e 8 metros, respectivamente, conforme mostrado na Fig. 10. Os cabos de ligação foram modelados por meio de uma indutância típica de 1 µH/m.

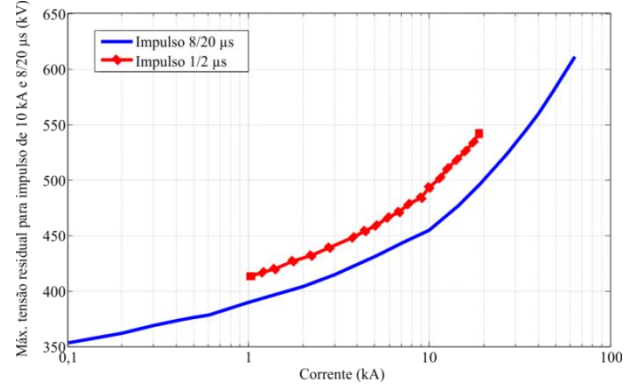


Fig. 7. Característica V-I de proteção do para-raios [14].

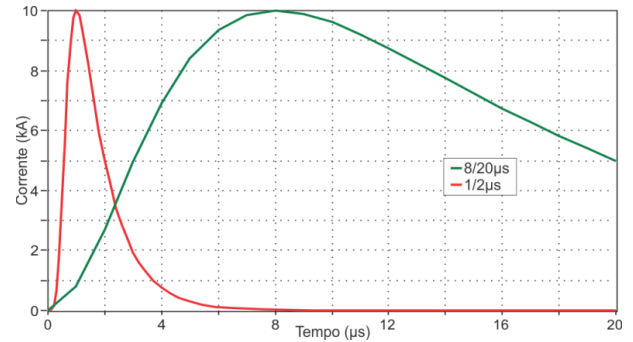


Fig. 8. Descargas atmosféricas simuladas.

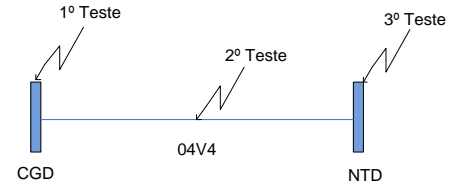


Fig. 9. Representação do procedimento de testes.

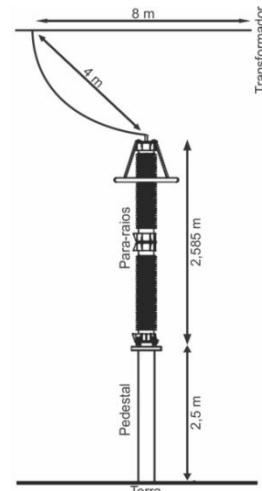


Fig. 10. Arranjo de ligações do para-raios [16].

## V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Um surto atmosférico da forma 8/20  $\mu$ s de 10 kA foi aplicado na barra NTD. As formas de onda resultantes das sobretensões ocorridas nas barras CGD e NTD são apresentadas na Fig. 11. Os níveis mais altos de sobretensões, em azul e rosa, correspondem ao sistema sem a presença de para-raios. As curvas em marrom e cinza correspondem às sobretensões no sistema com a presença de para-raios modelados a partir do modelo IEEE, sem considerar o arranjo de ligação. E as curvas em vermelho e verde correspondem às sobretensões no sistema com a presença de para-raios modelados a partir do modelo IEEE, considerando o arranjo de ligações. Observa-se na Fig.11 que as sobretensões na barra NTD foram reduzida em aproximadamente 60%, com a presença do para-raios. Nota-se também que as sobretensões na barra CGD são menores do que na barra NTD, este fato ocorre devido ao amortecimento ao longo da linha de transmissão. Além das sobretensões, é mostrado na Fig.11 o tempo de tráfego da descarga ao longo da linha (com cerca de 188 km de comprimento) e as reflexões de onda devido às terminações e descontinuidades do sistema.

Analisando os resultados das simulações realizadas, observou-se que os níveis de sobretensões nos barramentos onde as descargas ocorreram, foram maiores do que nas demais barras. Por exemplo, para o sistema com o modelo do IEEE sem considerar o arranjo de ligação, a tensão residual foi 437,87 kV quando uma descarga de 10kA com forma de onda 8/20 $\mu$ s foi aplicada na barra NTD, enquanto que na barra CGD a tensão residual foi 92,94 kV. Isso ocorre por dois motivos, o primeiro por causa das perdas ao longo da linha de transmissão, que tem cerca de 188 km, e o segundo por causa da atuação dos para-raios na redução do nível de sobretensão. Este fenômeno ocorreu em todas as simulações, ou seja, sempre as sobretensões foram maiores no ponto de aplicação da descarga. Além disso, quando a descarga ocorreu no meio da linha, as sobretensões foram maiores na barra NTD quando comparada com aquelas na barra CGD, devido à presença de reatores e reflexões nos terminais do barramento NTD, como ilustrado na Fig.6.

Comparando as tensões residuais devido a operação dos modelos de para-raios, verificou-se que as mesmas foram semelhantes para todos os modelos quando um impulso atmosférico padrão (8/20 $\mu$ s) foi aplicada ao sistema. No entanto, para impulsos atmosféricos de frente rápida (1/2 $\mu$ s) houve diferenças significativas nos resultados, principalmente, entre os modelos Cigré, IEEE e Pinceti, em relação ao modelo Convencional (Conv.). Essas diferenças podem ser exemplificadas no gráfico da Fig. 12, onde são apresentados os níveis da tensão residual na barra NTD, quando as descargas foram aplicadas na mesma, para o caso em que o arranjo de ligação não foi considerado.

Na Fig. 12 pode-se observar que as tensões residuais para cada modelo, quando a descarga aplicada foi da forma 8/20  $\mu$ s foram próximas a 420kV. Contudo, as tensões residuais apresentaram diferenças significativas entre os modelos quando a descarga apresentava frente rápida, ou seja, do tipo 1/2 $\mu$ s.

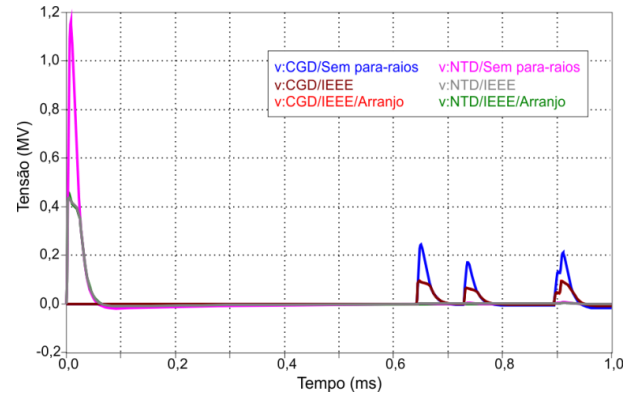


Fig. 11. Sobretensões nas barras CGD e NTD quando uma descarga de 10kA com forma de onda 8/20 $\mu$ s foi aplicada na barra NTD.

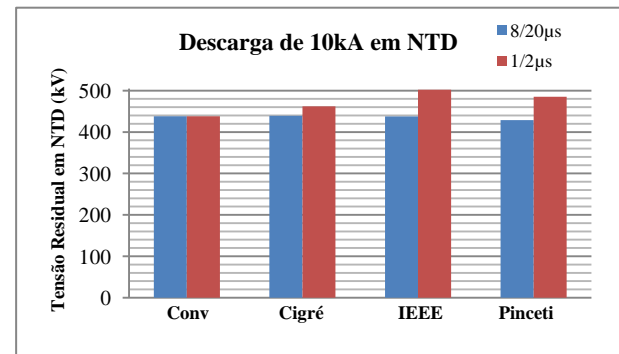


Fig. 12. Tensões residuais na barra NTD quando descargas de 10kA de formas de onda 8/20 $\mu$ s e 1/2 $\mu$ s foram aplicadas na mesma.

Para as descargas do tipo 1/2 $\mu$ s, o comportamento dos modelos Cigré, IEEE e Pinceti apresentaram, respectivamente, sobretensões de 6%, 15% e 11% superiores ao modelo convencional. Isto era esperado, uma vez que os modelos Cigré, IEEE e Pinceti representam o comportamento dinâmico do para-raios, ou seja, há um aumento no pico da tensão para uma diminuição no tempo frente do impulso. Visto que o modelo convencional não representa o comportamento dinâmico do para-raios, uma vez que é composto apenas por uma resistência não linear, sem a presença de elementos dependentes da frequência, como capacitores e indutores, este modelo não apresentou variações significativas em seus resultados para descargas com forma de onda 8/20 $\mu$ s e 1/2 $\mu$ s.

Considerando o arranjo de ligações dos para-raios, obtiveram-se tensões residuais maiores em relação aos resultados sem o arranjo de ligação, contudo, essas variações não foram significativas para descargas com forma de onda 8/20  $\mu$ s, como pode ser observado na Fig. 11, a partir das curvas em marrom e vermelho e em cinza e verde, quando uma descarga de 10kA foi aplicada na barra NTD.

No entanto, para descargas com forma de onda 1/2  $\mu$ s as variações foram significativas. O resultado mais crítico foi obtido ao se avaliar a tensão residual na barra NTD para uma descarga atmosférica com forma 1/2  $\mu$ s aplicada à mesma, utilizando o modelo IEEE. Para este caso obteve-se uma tensão residual de 689,36 kV com o arranjo de ligações, correspondendo a um aumento de aproximadamente 37% em

relação à tensão residual de 502,28 kV obtida sem o arranjo de ligação. O resultado pode ser visto na Fig. 13, onde o nível mais alto de sobretensão, em rosa, corresponde a tensão na barra sem para-raios. A curva em cinza corresponde a sobretensão na barra com a presença de para-raios modelados a partir do modelo do IEEE, sem considerar o arranjo de ligação. E a curva em verde, corresponde a sobretensão na barra com a presença de para-raios modelados a partir do modelo IEEE, considerando o arranjo de ligações.

Os valores das tensões residuais obtidas na barra NTD, para todos os modelos, quando uma descarga atmosférica de 10 kA com forma de onda  $1/2\mu\text{s}$  foi aplicada à mesma, podem ser visualizadas na Fig. 14. Pode-se observar que as tensões residuais obtiveram um aumento de aproximadamente 37%, 46%, 37% e 40%, para os modelos Convencional, Cigré, IEEE e Pinceti, respectivamente. Estes resultados mostram que o arranjo de ligações dos para-raios é um parâmetro importante de simulação que deve ser levado em consideração quando o surto apresentar frente de onda íngreme.

Com base nas simulações realizadas, aparentemente os modelos Cigré, IEEE e Pinceti produziram resultados mais realistas do que o modelo convencional. Por outro lado, também existem duas principais desvantagens destes modelos dinâmicos. A primeira está relacionada ao procedimento de ajuste dos parâmetros dos modelos que nem sempre são precisos e/ou fáceis de realizar. Os trabalhos [17] e [18] relataram procedimentos automáticos e precisos para estimar os parâmetros dos modelos.

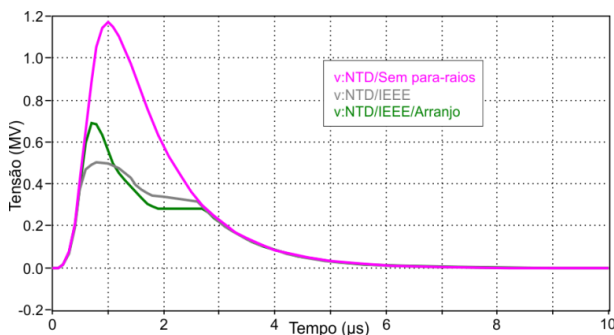


Fig. 13. Sobretensões nas barras CGD e NTD quando uma descarga de 10kA com forma de onda  $1/2\mu\text{s}$  foi aplicada na barra NTD.

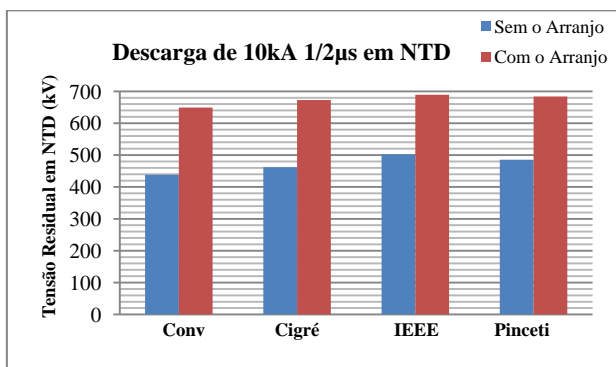


Fig. 14. Variação da tensão residual na barra NTD quando descargas de 10kA de forma de onda  $1/2\mu\text{s}$  foram aplicadas na mesma.

A segunda desvantagem se refere à pequena faixa de tempo de frente do impulso para os quais os modelos IEEE e Pinceti apresentam bons resultados – aproximadamente 0,5 a 45  $\mu\text{s}$  para o modelo do IEEE [5] e 1 a 30  $\mu\text{s}$  para o modelo do Pinceti [7]. Este problema poderia ser explorado em trabalhos futuros, considerando-se que o processo de simulação se tornaria mais simples de implementar se apenas um modelo fosse utilizado nos diversos tipos de simulações digitais envolvendo para-raios a ZnO.

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre o desempenho de alguns modelos de para-raios a ZnO em uma configuração real de um sistema de energia elétrica. Dados reais foram utilizados nas simulações digitais. Impulsos de corrente representando descargas atmosféricas, de 10 kA com formas de onda  $8/20\mu\text{s}$  e  $1/2\mu\text{s}$ , foram aplicadas ao sistema com e sem a presença de para-raios.

Diversas simulações foram realizadas e o desempenho dos modelos foi avaliado. O modelo convencional apresentou resultados coerentes para correntes com forma de onda  $8/20\mu\text{s}$ , quando comparado com os outros modelos, no entanto, este modelo é incapaz de representar o comportamento dinâmico dos para-raios. Se forem considerados transitórios mais rápidos, variações percentuais nos níveis das sobretensões de até 15% podem ser observadas entre o modelo Convencional e os demais.

Uma outra análise foi feita considerando ou não os efeitos da indutância do arranjo de ligações do para-raios ao sistema. Os resultados ressaltam que o efeito da indutância do arranjo de ligações do para-raios ao sistema influencia nos níveis das sobretensões simuladas, podendo gerar diferenças significativas nos resultados. Pode-se observar que as tensões residuais obtiveram um aumento de aproximadamente 37%, 46%, 37% e 40%, para os modelos Convencional, Cigré, IEEE e Pinceti, respectivamente.

Os modelos do Cigré, IEEE e Pinceti (dinâmicos) apresentaram bons resultados para descargas com formas de onda  $8/20\mu\text{s}$  e  $1/2\mu\text{s}$ . No entanto, eles trabalham em uma faixa limitada de tempo de crista e apresentam um processo empírico no ajuste dos parâmetros, que nem sempre garante bons resultados. Estes inconvenientes podem dificultar o uso dos modelos em simulações digitais.

Neste trabalho foram mostrados os efeitos de dois parâmetros (dependência da frequência e da indutância do arranjo de ligações) nos níveis da tensão residual dos para-raios. Os resultados obtidos mostram que estes parâmetros devem ser levados em consideração durante a realização de estudos de coordenação de isolamentos. Além disto, pesquisas como esta enfatizam a necessidade de mais esforços na modelagem de para-raios a ZnO com o objetivo de obter um modelo exato, flexível e seguro na modelagem de para-raios em sistemas de energia elétrica.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] S. Tominaga, K. Azumi, Y. Shibuya, M. Imataki, Y. Fujiwara and S. Nichida, "Protective Performance of Metal Oxide Surge Arrester Based on The Dynamic V-I Characteristics", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, pp. 1860-1871, 1979.



- [2] Leuven EMTP Center, *Alternative Transients Program – Rule Book*, Heverlee, Belgium, 1987.
- [3] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl and D. Qiu, “Behavior of MO- Surge Arrester Blocks to Fast Transients”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, N° 1, pp. 292-300, 1989.
- [4] A. R. Hileman and K. H. Weck, “Protection Performance of Metal Oxide Surge Arresters”, *ELECTRA*, pp. 133-146, Dec. 1990.
- [5] IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling, “Modeling of Metal Oxide Surge Arresters”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 302–309, Jan. 1992.
- [6] I.Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara and M. Kobayashi, “Study of ZnO Arrester Model for Steep Front Wave”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, N°2, pp. 834-841, Apr. 1996.
- [7] P. Pinceti and M. Giannettoni, “A Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 393–398, Apr. 1999.
- [8] A. R. Hileman, J. Roguin, K. H. Weck, “Metal oxide surge arresters in AC systems - Part V: Protection performance of metal oxide surge arresters”, *Electra*, no. 133, pp. 132–144, Dec. 1990.
- [9] F. Fernandez and R.Diaz, “Metal Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations”, in *Proc. 2001 International Conference on Power System Transients - IPST*, paper 144.
- [10] E. G. Costa, “Análise do desempenho de para-raios de Óxido de zinco,” Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, 1999.
- [11] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*. New York, USA, Marcel Dekker, Inc, 1999.
- [12] A. Bayadi, N. Harid, K. Zehar and S. Belkhat, “Simulation of Metal Oxide Surge Arrester Dynamic Behavior Under Fast Transients”, in *Proc. 2003 International Conference on Power System Transients – IPST*.
- [13] ABB, Surge Arresters — Buyer’s Guide, Edition 8, 2010-12, Ludvika, Sweden, 2009.
- [14] ABB, Technical Information - TOV Capability and Protective Characteristics for Surge Arresters Type EXLIM and PEXLIM. 2. ed. Ludvika, Sweden, Nov 2004.
- [15] F. Heidler, J.M. Cvetican and B.V. Stanic, “Calculation of Lightning Current Parameters”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, No 2, pp. 399–597, April 1999.
- [16] V. Hinrichsen, Metal Oxide Surge Arrester Fundamentals. Siemens AG, Berlin - Germany, 2001.
- [17] S. H. Li, S. Birlasekaram and S. S. Choi, "A Parameter Identification Technique for Metal-Oxide Surge Arrester Models", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n° 3, pp. 736–741, July 2002.
- [18] G. R. S. Lira, D. Fernandes Jr., and E. G. Costa, “Parameter Identification Technique for a Dynamic Metal-oxide Surge Arrester Model”, in *Proc. 2009 International Conference on Power System Transients – IPST*, paper 48.

## VIII. BIOGRAFIAS

**George R. S. Lira** nasceu em Cajazeiras, Paraíba, Brasil, em 1980. Recebeu os títulos de B. Sc. e M. Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Brasil, em 2005 e 2008, respectivamente. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG. Tem especial interesse nas áreas de transitórios eletromagnéticos, alta tensão e técnicas de otimização aplicadas à sistemas elétricos.

**Luiz A. M. M. Nobrega** nasceu em Patos, Paraíba, em 1991. Atualmente é aluno de graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, Brasil, com ênfase na área de Sistemas Elétricos de Potência. Suas áreas de interesse são: mapeamento de campos elétricos, para-raios, transitórios eletromagnéticos e sistemas de isolamento.

**Luana V. Gomes** é graduada em Engenharia Elétrica nas ênfases de eletrotécnica e telecomunicações pela Universidade Federal da Campina Grande (UFCG), Paraíba, Brasil. Realizou intercâmbio acadêmico no INP Grenoble-ESISAR, França, em 2009. Atualmente é aluna de Mestrado em Engenharia Elétrica, na área de Sistemas de Potência, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Suas principais áreas de pesquisas são: aterramento elétrico, para-raios e sistemas embarcados.

**Edson G. da Costa** obteve os títulos de bacharel, mestre e doutor em Engenharia Elétrica, respectivamente em 1978, 1981 e 1999 (Universidade Federal da Paraíba). Desde 1978 trabalha como professor na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, Brasil. Seus interesses profissionais incluem equipamentos de alta tensão, mapeamento de campo elétrico, descargas parciais, método dos elementos finitos, para-raios e sistemas de isolamento. O Dr. Guedes também é membro do IEEE, CIGRÊ e SBA.

**Marcelo J. A. Maia** graduou-se em Engenharia Elétrica em 1978. Desde então trabalha na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco –Chesf. Suas áreas de interesse são sistemas de potência, para-raios, transmissão e distribuição de energia elétrica.