SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GSC 24
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELOS DE PÁRA-RAIOS A ÓXIDO DE ZINCO FRENTE A SURTOS RÁPIDOS

George R. S. de Lira * **Edson Guedes da Costa*** **Damásio Fernandes Jr.***
Fábio M. S. Pereira* **Marcelo J. A. Maia****

Universidade Federal de Campina Grande* **Companhia Hidro Elétrica do São Francisco****

RESUMO

Os pára-raios de óxido de zinco (ZnO) são utilizados como dispositivos de proteção contra sobretensões em sistemas elétricos. Devido a sua importância, diversos modelos foram propostos no intuito de fornecer uma ferramenta para estudos de coordenação de isolamento, estimação do tempo de vida útil, seleção correta de pára-raios, entre outros. Dessa forma, é realizada neste trabalho, uma análise de desempenho de modelos de pára-raios a óxido de zinco frente a surtos rápidos. São realizadas comparações entre valores de energia absorvida, tensão residual e taxa de inclinação inicial de tensão (kV/μs), fornecidos pelos modelos, com valores obtidos em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE

Pára-raios a óxido de zinco, Modelo de pára-raios, Transitórios eletromagnéticos, EMTP/ATP

1.0 - INTRODUÇÃO

Os pára-raios ou supressores de surtos são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões de origem externa (por exemplo, descargas atmosféricas) ou interna (por exemplo, sobretensões de manobra). Seu papel é limitar o nível de tensão que atinge equipamentos importantes, como os transformadores de potência, evitando que os mesmos sejam submetidos a sobretensões inadequadas a sua operação (1).

Construtivamente, os pára-raios a óxido de zinco (ZnO) têm uma estrutura simples, são formados por uma ou mais colunas de blocos cilíndricos varistores. Eles apresentam uma característica tensão-corrente (*V-I*) extremamente não-linear, uma alta capacidade de absorção de energia e uma forte dependência com a temperatura (2) e (3). Além dessas características, os pára-raios a ZnO apresentam uma característica dinâmica (ou dependente da freqüência) que só é observada durante a aplicação de impulsos de corrente atmosféricos ou outros surtos com frentes de onda rápidas. Esta característica dinâmica refere-se ao fato de que a tensão sobre o pára-raios aumenta com a diminuição do tempo de crista da corrente que o percorre, e que, o pico da tensão ocorre antes do pico da corrente (4), (5) e (6). Medições mostram que a tensão de descarga do pára-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 μs para 1,3 μs (4).

Neste trabalho, é realizada a análise de desempenho de alguns modelos de pára-raios de ZnO, que contemplam, além da característica não-linear, a sua característica dinâmica (4), (7) e (8). A precisão de cada modelo é determinada a partir de comparações realizadas entre valores simulados e medidos de tensão residual, taxa de inclinação inicial da tensão e energia absorvida pelo pára-raios, durante a aplicação de impulsos de corrente atmosféricos (forma de onda 8/20 μs) e impulsos rápidos (tempo de frente em torno de 1 μs).

(*) Av. Aprígio Veloso, 882 – UFCG/DEE/LAT - Bloco CF – CEP 58.109-970 Campina Grande, PB – Brasil
Tel: (+55 83) 3310-1140 – Fax: (+55 83) 3310-1401 – E-mail: george_lira@yahoo.com.br

2.0 - MODELOS DE PÁRA-RAIOS A ÓXIDO DE ZINCO

Os modelos de pára-raios a ZnO podem ser agrupados em duas categorias:

- Modelos para freqüência industrial e para transitórios de frente lenta, tais como sobretensões de manobra. Estes modelos contemplam apenas a alta não-linearidade dos pára-raios, sendo representados, portanto, por uma simples resistência não-linear. Esta resistência é definida a partir dos pontos da curva característica do pára-raios (6) e (9);
- Modelos para transitórios rápidos, tais como aqueles oriundos de descargas atmosféricas. Estes modelos representam as características não-linear e dinâmica do pára-raios para surtos com tempos de frente de onda compreendidos em um intervalo de poucos microsegundos (4), (7), (8) e (10).

A seguir, será realizada uma breve descrição dos modelos, dependentes da freqüência, de pára-raios de ZnO mais utilizados atualmente.

2.1 Modelo Proposto pelo IEEE

No modelo dependente da freqüência proposto por (4), tem-se que a característica *V-I* não-linear do pára-raios é representada por duas seções de resistências não-lineares designadas por *A*0 e *A*1, e definidas através das curvas mostradas na Figura 1. As duas seções são separadas por um filtro *R-L*. Para surtos lentos, o filtro *R-L* possui uma impedância muito pequena, deixando *A*0 e *A*1 praticamente em paralelo. Para surtos rápidos, a impedância do filtro *R-L* torna-se mais elevada, conseqüentemente a corrente no elemento não-linear *A*0 aumenta, assim como, a tensão. Dessa forma, representa-se a característica dinâmica do pára-raios (aumento no tempo de frente da corrente implica na elevação da tensão). Na Figura 2 é mostrado o modelo dependente da freqüência.

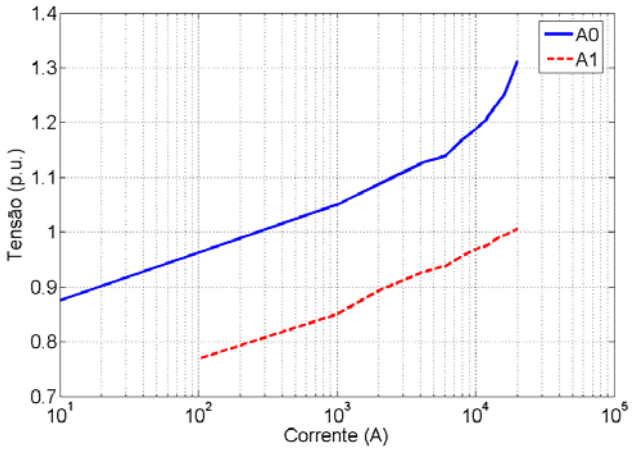

FIGURA 1 – Curvas características de *A*0 e *A*1.

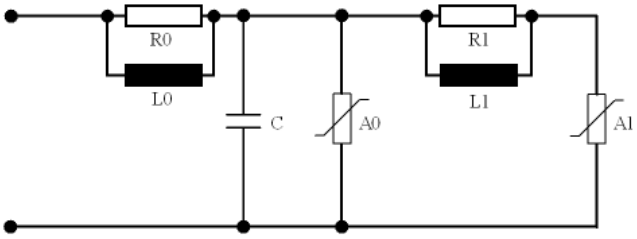

FIGURA 2 - Modelo proposto pelo IEEE.

Conforme pode ser visto na Figura 2, o modelo possui além das resistências não-lineares *A*0 e *A*1, a indutância L_0, que representa a indutância associada ao campo magnético existente nas vizinhanças do pára-raios. Um resistor R_0 serve para evitar problemas com a integração numérica utilizada em simulações digitais. O capacitor *C* representa a capacitância entre os terminais do pára-raios. Os elementos R_1 e L_1 correspondem ao filtro *R-L* utilizado para representar a característica dinâmica do pára-raios. Uma estimativa inicial desses parâmetros pode ser obtida através das fórmulas da Equação 1.

$$
\begin{aligned}
L_1 &= 15d/n \ \ (\mu\text{H}) \\
\text{R}_1 &= 65d/n \ \ (\Omega) \\
L_0 &= 0,2d/n \ \ (\mu\text{H}) \\
\text{R}_0 &= 100d/n \ \ (\Omega) \\
C &= 100n/d \ \ (\text{pF})
\end{aligned}
\tag{1}
$$

sendo que:

d é altura estimada do pára-raios em metros;
n é o número de colunas paralelas do pára-raios.

Após a obtenção das estimativas iniciais, deve-se partir para o procedimento manual de ajuste de parâmetros apresentado a seguir:

- Ajustar os valores por unidade das tensões nas curvas características de *A*0 e *A*1, de forma que se obtenha uma boa concordância com os valores de tensão de descarga para uma sobretensão de manobra, informados pelo fabricante;
- Através de um processo iterativo, ajustar *L*1 para se obter um valor de tensão de descarga próximo ao encontrado no catálogo do fabricante, para aplicação de um impulso de corrente atmosférico.

Este modelo funciona para impulsos de corrente com tempos de frente compreendidos entre 0,5 μs e 45 μs.

2.2 Modelo Proposto por Pinceti & Giannettoni

Em (7), foi realizada uma simplificação do modelo proposto em (4). Nessa simplificação, foram propostos, novos procedimentos de ajuste dos parâmetros, de forma a evitar o uso de processos iterativos e dados inexistentes nos catálogos dos fabricantes. O modelo simplificado é mostrado na Figura 3.

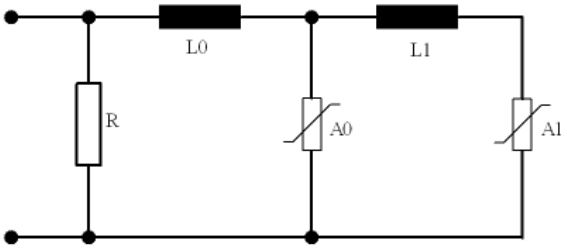

FIGURA 3 – Modelo proposto por (3).

Pode-se notar, a partir da Figura 3, que a capacitância existente no modelo do IEEE (Figura 2) foi eliminada, pois os autores consideraram que seu efeito no comportamento do modelo é desprezível. Da mesma forma, as duas resistências em paralelo com os indutores L_0 e L_1 foram substituídas por uma única resistência *R*, de aproximadamente 10 MΩ colocada entre os terminais de entrada do modelo. A resistência *R* serve apenas para evitar problemas numéricos durante a simulação do modelo.

As resistências *A*0 e *A*1 são determinadas a partir das curvas mostradas na Figura 1. As indutâncias L_0 e L_1 são definidas a partir das fórmulas da Equação 2.

$$
\begin{aligned}
L_1 &= \frac{1}{4}\frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} V_n \quad (\mu\text{H}) \\
L_0 &= \frac{1}{12}\frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} V_n \quad (\mu\text{H})
\end{aligned}
\tag{2}
$$

em que:

V_n é a tensão nominal do pára-raios (kV);
$V_{r1/T2}$ é a tensão residual (kV) correspondente à aplicação de impulso de corrente rápido de 10 kA (frente de onda em torno de 1 μs);
$V_{r8/20}$ é a tensão residual (kV) para um impulso de corrente atmosférico (forma de onda 8/20 μs) de 10 kA.

Este modelo funciona para impulsos de corrente com tempos de frente compreendidos entre 1 e 30 μs.

2.3 Modelo Proposto por Fenandez & Diaz

O modelo proposto por Fernandez & Diaz (8) é mostrado na Figura 4. Como se pode notar, o modelo é mais uma simplificação daquele proposto pelo IEEE. Assim como no modelo proposto em (7), as resistências, R_0 e R_1, em paralelo com as indutâncias L_0 e L_1 foram substituídas por uma resistência, R, em paralelo com o resistor não-linear A_0. A resistência R tem por finalidade evitar oscilações numéricas. Outro parâmetro desprezado na simplificação foi o indutor L_0. Da mesma forma como no modelo proposto pelo IEEE, C_0 representa a capacitância entre os terminais do pára-raios, e L_1 compõe o filtro responsável pela característica dinâmica do modelo.

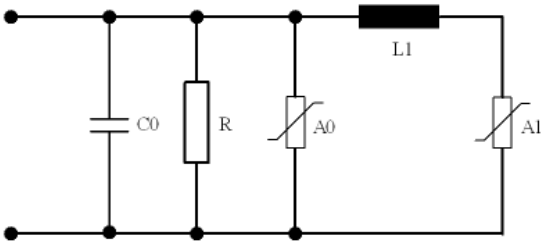

FIGURA 4 – Modelo proposto por Fernandez & Diaz (2001).

O procedimento de ajuste deste modelo é encontrado em (8). Este modelo só funciona para correntes com tempos de frente compreendidos entre 0,5 e 8 µs.

3.0 - MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

Ensaios de corrente de descarga foram realizados em dois varistores de óxido de zinco com características físicas e elétricas distintas. Na Tabela 1 são mostrados os dados técnicos dos varistores, fornecidos por fabricantes tradicionais.

TABELA 1 – Dados técnicos dos varistores 1 e 2.

Dados técnicos	Varistor 1	Varistor 2
Altura	0,0458 m	0,0286 m
Diâmetro	0,0383 m	0,0425 m
Tensão nominal	7,5 kV	4,0 kV
Tensão de operação contínua	6 kV	-
Capacidade de absorção de energia	3,6 kJ/kV	1,0 kJ/kV
Corrente nominal de descarga	10 kA	10 kA
Tensão residual impulso atmosférico de 5 kA	19,55 kV	12,00 kV
Tensão residual impulso atmosférico de 10 kA	21 kV	13 kV
Tensão residual impulso atmosférico de 20 kA	23,85 kV	-

Os ensaios de corrente de descarga foram realizados através de um gerador de impulsos de corrente existente no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande. Na Figura 4 é apresentado o arranjo experimental utilizado nesse ensaio. Através do circuito gerador é possível obter impulsos de corrente com várias formas de onda e diversas amplitudes, bastando para tal, realizar o ajuste adequado dos elementos R, L e C do circuito. Neste trabalho, foram realizados ensaios com impulsos corrente rápidos (forma de onda ≈1/10 µs) e impulsos de corrente atmosférico (forma de onda 8/20 µs). Os sinais de corrente e tensão oriundos desses ensaios foram obtidos através de uma resistência "shunt" (R_{shunt}) e de um divisor de tensão misto, respectivamente, em conjunto com um sistema de aquisição de dados, formado por um osciloscópio digital e uma rotina de aquisição de dados desenvolvida no Matlab®. Os sinais de tensão e corrente são armazenados em um PC, e após um tratamento adequado dos sinais, é possível obter os valores de tensão residual, taxa de inclinação inicial de tensão (kV/µs) e energia absorvida por cada bloco varistor.

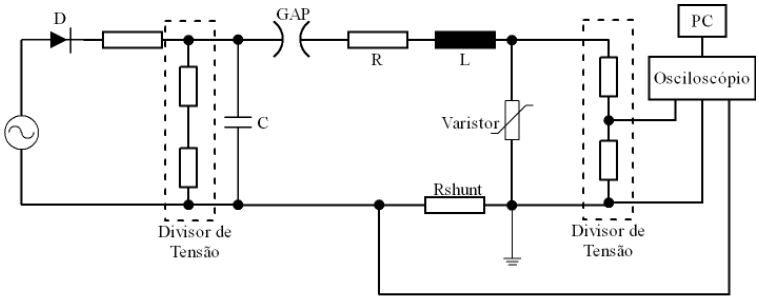

FIGURA 5 – Arranjo experimental utilizado no ensaio de corrente de descarga.

4.0 - SIMULAÇÕES DIGITAIS

As simulações digitais foram realizadas no ATP (9), utilizando o circuito mostrado na Figura 5. A fonte de corrente *i(t)* corresponde ao impulso de corrente obtido em laboratório. A resistência não-linear *R(i)* representa o varistor de óxido de zinco, e deve ser substituído por um dos modelos mostrados nas Figuras 2, 3 ou 4, conforme o caso que se for analisar. Os elementos não-lineares presentes nos modelos propostos (4), (7) e (8) são representados pelo resistor não-linear Type-92 do ATP. Em todas as simulações utilizou-se um tempo de simulação de 100 μs e passo de tempo de 40 ns. A partir das simulações digitais é possível obter os valores de tensão residual, taxa de inclinação inicial de tensão (kV/μs) e a energia absorvida por cada bloco varistor.

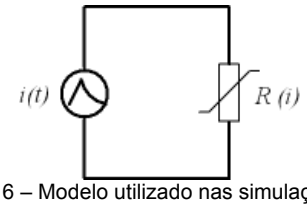

FIGURA 6 – Modelo utilizado nas simulações digitais.

5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores de pico das tensões residuais medidas e simuladas foram obtidos a partir das formas de onda da tensão sobre o pára-raios. As taxas de inclinação inicial das tensões residuais medidas e simuladas, foram obtidas a partir da seguinte expressão:

$$Ti = \left(\frac{v_{90\%} - v_{30\%}}{t_{90\%} - t_{30\%}} \right) \quad (\text{kV/}\mu\text{s}), \tag{3}$$

em que:

$v_{90\%}$ corresponde ao valor de 90% do pico da tensão residual, em kV;

$t_{90\%}$ é o instante de tempo (μs) no qual a tensão residual está com 90% do seu valor de pico;

$v_{30\%}$ corresponde ao valor de 30% do pico da tensão residual, em kV;

$t_{30\%}$ é o instante de tempo (μs) no qual a tensão residual está com 30% do seu valor de pico;

A energia absorvida pelo varistor em cada caso analisado é calculada através da equação 4.

$$E = \int_0^{t_f} v(t)i(t)dt \cong \sum_{j=1}^{n-1} \left[0.5h\left(V_j I_j + V_{j+1} I_{j+1} \right) \right] \tag{4}$$

Em que, $v(t)$ e $i(t)$ são os valores instantâneos da tensão e da corrente sobre o varistor, respectivamente. V_j e I_j são os valores de tensão e corrente amostrados nas medições e nas simulações. n é o número de amostras e h é o passo de cálculo.

A concordância entre as curvas de tensão residual medidas e simuladas é fornecida através da métrica R^2, definida a partir da equação (5). Quanto mais próximo de 1 (um) estiver o valor de R^2, mais preciso será o resultado simulado.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \text{ onde}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \left(Vm_j - Vs_j \right)^2 \quad \text{e} \quad SST = \sum_{i=1}^{n} \left(Vm_j - \overline{Vm} \right)^2 \tag{5}$$

em que, Vm_j e Vs_j são valores de tensão medidos e simulados, respectivamente, n é o número de amostras e $\overline{Vm}$ é a média da tensão medida. SSE é a soma quadrática dos erros entre sinais de tensão medidos e simulados, e SST é a soma dos erros quadráticos com relação à média do sinal de tensão medido.

A Tabela 2 sumariza os resultados de valor de pico da tensão residual (Vr_p), taxa de inclinação inicial da tensão (Ti), energia absorvida (E) e métrica (R^2) para o varistor 1. A Tabela 3 sumariza os mesmos resultados, para o varistor 2.

TABELA 2 – Resultados para o varistor 1.

Medições/modelos	Vr_p (kV)	Ti (kV/μs)	E (J)	R^2
Impulso de corrente 8/20 μs, 10 kA				
Medição	21557	28,502	6413,1	-
Modelo IEEE	21558	16,603	6497,7	0,96
Modelo Pinceti	22059	33,736	6496,6	0,92
Modelo Fernandez	23118	16,867	6136,3	0,69
Impulso de corrente 1/10 μs, 10 kA				
Medição	26269	82,548	3928,4	-
Modelo IEEE	23410	19,589	3822,0	0,90
Modelo Pinceti	24648	22,147	3816,9	0,78
Modelo Fernandez	26676	44,758	3501,7	0,58

TABELA 3 – Resultados para o varistor 2.

Medições/modelos	Vr_p (kV)	Ti (kV/μs)	E (J)	R^2
Impulso de corrente 8/20 μs, 10 kA				
Medição	13102	20,446	3151,9	-
Modelo IEEE	13110	10,544	3201,9	0,96
Modelo Pinceti	13287	10,047	3200,9	0,93
Modelo Fernandez	13681	31,940	3042,2	0,23
Impulso de corrente 1/10 μs, 10 kA				
Medição	15059	51,045	1623,7	-
Modelo IEEE	14124	12,859	1806,1	0,55
Modelo Pinceti	14572	11,650	1799,9	0,49
Modelo Fernandez	15390	88,450	1654,9	0,13

Nas Tabelas 2 e 3 pode-se observar que o modelo proposto em (4), apesar de possuir um procedimento de ajuste dos parâmetros mais complexo, produziu, no geral, resultados mais próximos daqueles obtidos através das medições.

O modelo proposto em (7) possui um procedimento de ajuste dos parâmetros bem mais simples do que aquele proposto por (4), além de fornecer resultados próximos daqueles obtidos em laboratório, tanto para impulsos de corrente 8/20 μs quanto 1/10 μs. Contudo, apesar das vantagens aparentes desse modelo, ele apresenta uma desvantagem que deve ser ressaltada: são as oscilações numéricas na forma de onda tensão no pára-raios, tanto para impulsos com formas de onda 8/20 μs quanto 1/10 μs. Nas Figuras 7 e 8 são mostradas comparações das tensões residuais medidas e simuladas (com o modelo do IEEE e o modelo de Pinceti, respectivamente) obtidas durante aplicação de impulso de corrente atmosférico de 10 kA e 8/20 μs no varistor 1. A partir destes resultados fica bastante evidente o grau de oscilação numérica existente no modelo proposto em (7).

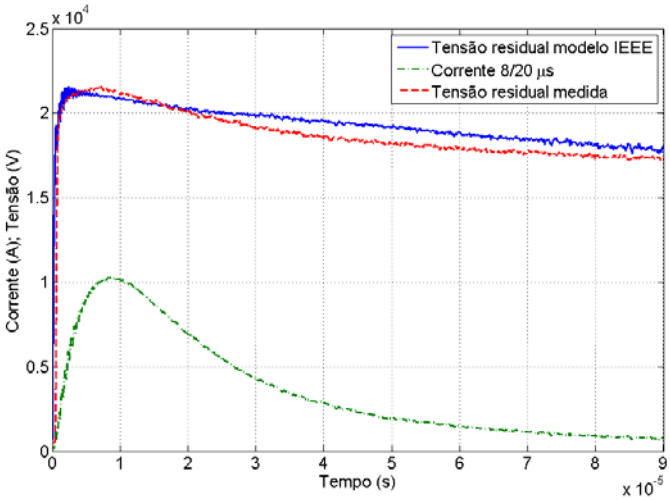

FIGURA 7 – Tensão residual medida em laboratório e simulada com o modelo do IEEEE para o varistor 1.

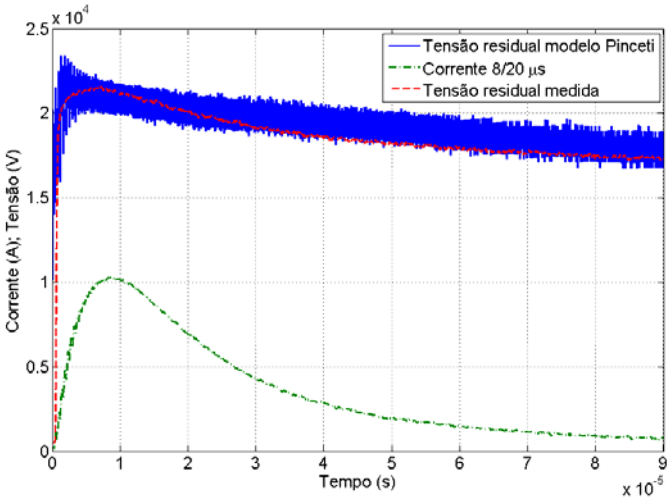

FIGURA 8 - Tensão residual medida em laboratório e simulada com o modelo de Pinceti para o varistor 1.

O modelo proposto em (8) possui um procedimento para determinação dos seus parâmetros elétricos que não é tão simples, e requer o conhecimento tanto de dados elétricos do pára-raios quanto de dados físicos. Os resultados fornecidos por tal modelo não foram precisos, exceto em algumas situações, conforme pode ser visto nas Tabelas 2 e 3. O modelo ainda apresentou alguma oscilação numérica e uma grande queda de tensão na cauda da forma de onda tensão residual. Esta queda de tensão contribuiu para os baixos valores de R^2 obtidos.

6.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada uma análise de desempenho de modelos de pára-raios a óxido de zinco frente a surtos rápidos. Foram comparados valores de energia absorvida, tensão residual e taxa de inclinação inicial da tensão (kV/µs), fornecidos pelos modelos, com aqueles obtidos em laboratório.

Foram feitas comparações entre as curvas de tensão residual obtidas através das simulações digitais com aquelas obtidas em laboratório e constatou-se que o modelo proposto pelo IEEE apresentou os melhores resultados na maioria dos casos. O modelo proposto por Pinceti & Giannettoni produziu bons resultados, contudo este modelo apresentou oscilações numéricas na forma de onda da tensão para todos os casos analisados. O modelo proposto por Fernandez & Diaz não apresentou bons resultados, salvos algumas exceções.

Dessa forma, recomenda-se o uso do modelo de pára-raios proposto pelo IEEE para estudos de transitórios rápidos.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a KVA Engenharia e Equipamentos pela doação de blocos varistores de óxido de zinco necessários à realização dos ensaios apresentados neste trabalho.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; FILHO, O. K.; MORAIS, S. de A. Equipamentos Elétricos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Niterói, RJ - Brasil: EDUFF - Editora da Universidade Federal Fluminense, 1985.

(2) COSTA, E. G. Análise do Desempenho de Pára-raios de Óxido de Zinco. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 1999.

(3) HILEMAN, A. R. Insulation Coordination for Power Systems. New York, USA: Marcel Dekker, Inc, 1999.

(4) IEEE WORKING GROUP 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 302–309, January 1992.

(5) SURGE PROTECTIVE DEVICES COMMITTEE. IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems. New York, NY - USA, 1998.

(6) MARTINEZ, J. A.; DURBAK, D. W. Parameter determination for modeling systems transients - Part V: Surge arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 3, p. 2073–2078, July 2005.

(7) PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 2, p. 393–398, April 1999.

(8) FERNANDEZ, F.; DIAZ, R. Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations. In: IPST - THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Rio de Janeiro - Brasil, 2001.

(9) LEUVEN EMTP CENTER. Alternative Transients Program – Rule Book. Heverlee, Belgium, 1987.

(10) KIM, I.; FUNABASHI, T.; SASAKI, H.; HAGIWARA, T.; KOBAYASHI, M. Study of ZnO arrester model for steep front wave. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 2, p. 834–841, April 1996.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

George Rossany Soares de Lira
Nascido em Cajazeiras, PB em 30 de março de 1980.
Mestrado (Atualmente em curso) e Graduação (2005) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, PB.

Edson Guedes da Costa
Nascido em Ribeirão, PE, em 31 de janeiro de 1954.
Doutorado (1999), Mestrado (1981) e Graduação (1978) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal da Paraíba
Universidade Federal da Paraíba (1978-2002)
Universidade Federal de Campina Grande, desde 2002
Professor do Departamento de Engenharia Elétrica.

Damásio Fernandes Júnior
Nascido em Paulo Afonso, BA, em 18 de setembro de 1973.
Doutorado (2004) Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Campina Grande
Mestrado (1999) e Graduação (1997) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal da Paraíba
Universidade Federal de Campina Grande, desde 2003
Professor do Departamento de Engenharia Elétrica.

Fábio Marcelo Soares Pereira
Nascido em Cajazeiras, PB, em 26 de julho de 1985.
Graduação (em andamento) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Campina Grande

Marcelo José de Albuquerque Maia
Nascido em Campina Grande, PB, em 1956.
Graduação (1978) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal da Paraíba
Empresa: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, desde 1978.