



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 17
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

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

**COMPARAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE MODELOS DE VARISTORES DE ÓXIDO DE ZINCO NO
PROGRAMA ATP PARA PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES**

ANDRÉ MEISTER *

MARCO AURÉLIO GONÇALVES DE OLIVEIRA

MARTE ENGENHARIA LTDA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

RESUMO

As descargas atmosféricas são um dos principais fatores de falha nos sistemas elétricos de potência. Recentemente, os pára-raios de óxido de zinco têm sido amplamente utilizados, sendo um equipamento essencial na coordenação de isolamento devido às suas características não-lineares peculiares. O estudo da característica dinâmica dos pára-raios tem a finalidade de prover um desempenho preciso durante sua operação. Vários modelos foram desenvolvidos para a correta representação do equipamento em programas computacionais. A finalidade deste trabalho é apresentar um estudo comparativo entre estes modelos e indicar sua melhor aplicação dependendo do estudo a ser realizado, bem como o esforço computacional necessário.

PALAVRAS-CHAVE

Sobretensões, Varistores, Característica Dinâmica, Modelagem, ATP.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os varistores limitam as sobretensões temporárias devido a surtos de manobra ou atmosféricos sobre os diversos elementos protegidos por ele conduzindo o excesso de corrente do sistema, o que de outra forma causaria danos aos equipamentos.

A tecnologia do uso de varistores de óxido de zinco em substituição ao convencional de carbonato de silício, trouxe benefícios em relação à proteção contra sobretensões, porém também exigiu que nos estudos pré-operacionais, estes elementos fossem modelados adequadamente em programas disponíveis no setor elétrico. O programa ATP – *Alternative Transients Program* permite a modelagem deste dispositivo resistivo não-linear exponencial através da rotina ZnO *Fitter* a qual fornece subsídio para o cartão *Type 92* (1). As informações das propriedades dos varistores de óxido de zinco indicam que estes dispositivos possuem uma característica dinâmica, dependente da frequência, a qual não é representada pelo modelo convencional do ATP.

Para surtos de frentes de ondas rápidos com tempo de crista inferior a 8 μ s, o pico da onda de tensão ocorre antes do pico de corrente e a tensão residual sobre o varistor aumenta com a diminuição do tempo de crista. Este aumento pode se aproximar de 6% quando o tempo da frente de onda é reduzido de 8 para 1,3 μ s. Informações provenientes do grupo de trabalho IEEE 3.4.11 (2), indicam aumento da tensão residual de até 12%. Desta forma, a tensão sobre o varistor não é somente uma função da corrente de descarga, mas também da taxa de sua

Marte Engenharia LTDA
SCN – Quadra 06 – Conjunto “A” – Bloco A – Sala 714 – Brasília – DF – CEP: 70716-900
Tel: (61) 328-5888 Fax: (61) 328-5888
E-mail: andre.meister@martedf.com.br

subida. Este fato torna-se relevante principalmente quando de estudos de coordenação de isolamento e localização do varistor. Para estudos de sobretensão temporária e de surtos de manobra, um varistor pode ser modelado escolhendo-se adequadamente a característica tensão-corrente.

Muitos modelos têm sido propostos para simular esta característica dependente da frequência. O modelo recomendado pelo IEEE, apesar de ter por objetivo ser um modelo matemático que reproduza estes efeitos sem exigir muito esforço computacional, exige método iterativo e a necessidade de se ter dados construtivos do varistor como comprimento total, diâmetro do bloco e número de colunas dificulta sua modelagem. Outros modelos foram desenvolvidos, porém as dificuldades surgem no cálculo e ajuste dos parâmetros, pois em alguns casos, são utilizados procedimentos iterativos enquanto que em outros a informação necessária nem sempre é facilmente obtida através dos relatórios dos fabricantes.

Pretende-se através deste trabalho realizar uma comparação entre diversos modelos de varistores de óxido de zinco no ATP e indicar a melhor aplicação em função do estudo a ser realizado, tendo como referência a documentação usualmente fornecida pelo fabricante do equipamento. Para tanto, utilizar-se-ão como ponto de partida os trabalhos publicados por autores que se valem de modelos simples como a adição de elementos, lineares ou não, em série com o varistor. Bem como modelos derivados do modelo do IEEE com algumas simplificações, as quais, segundo os autores, não comprometem os resultados comparativos com os relatórios de fabricantes.

2.0 - MODELOS DE PÁRA-RAIOS

2.1 Modelo convencional ATP

A representação de resistores não-lineares no ATP é realizada através da relação exponencial não-linear entre a tensão e a corrente no equipamento. Esta característica possui vários segmentos exponenciais, cada um definido conforme equação a seguir:

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

Nesta equação q é o expoente, p um multiplicador e V_{ref} é uma referência arbitrária de tensão que normaliza a equação e previne oscilações numéricas. O primeiro segmento do dispositivo é linear, o que acelera a simulação. A resistência deste primeiro segmento deve ser grande o suficiente para que, em regime permanente, a influência do varistor seja muito pequena, menor do que 0,1 A. O segundo segmento é definido pelos parâmetros p , q e um valor de tensão mínimo. Quando a tensão excede a este valor, o algoritmo realiza uma iteração a cada passo para encontrar uma solução que satisfaça a equação. Múltiplos segmentos promovem maior precisão ao modelo.

Neste modelo o pico de tensão ocorre no mesmo tempo do pico de corrente, mesmo para surtos rápidos de corrente e, portanto, não é adequado para representação de fenômenos dependentes da frequência.

2.2 Modelo Tominaga et al

Na procura por um modelo dependente da frequência, levou-se em consideração a variação da tensão do varistor com o tempo de pico da corrente, adicionando-se uma indutância em série com o resistor não-linear (3). Esta aproximação possui seu mérito, pois a tensão sobre uma indutância e, portanto, através do varistor, aumenta proporcionalmente à taxa de variação da corrente no tempo. O modelo é mostrado na Figura 1:

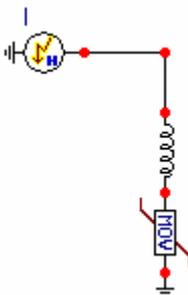


FIGURA 1 – Modelo de Tominaga et al.

No entanto, este modelo somente é eficaz para condições específicas. Por exemplo, uma indutância pode ser escolhida para representar adequadamente o comportamento do varistor em resposta a um surto de corrente com frente de onda de $8\mu\text{s}$. O mesmo modelo testado com uma frente de onda de $2\mu\text{s}$ apresenta resultados muito diferentes daqueles indicados pelo fabricante.

2.3 Modelo Kim et al

Seguindo o modelo anteriormente proposto, uma indutância não-linear foi conectada em série com o varistor (4). Um laço de histerese pode ser construído a partir dos dados de tensão e corrente a serem disponibilizados pelo fabricante, e, a partir do laço de histerese, determina-se o valor da indutância para o circuito indicado na Figura 2:

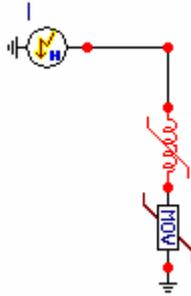


FIGURA 2 – Modelo Kim et al.

A necessidade de se criar um programa de cálculo da indutância não-linear, somado ao fato de se precisar de um grande número de pontos da característica tensão-corrente do varistor (no mínimo 20 pontos), constituem limitações à aplicação do modelo.

2.4 Modelo IEEE

Diante das dificuldades encontradas, verificou-se a necessidade de se criar um modelo mais sofisticado para representar a resposta do varistor à corrente com uma grande variação de tempos de subida. O modelo desenvolvido pelo grupo de trabalho 3.4.11 do IEEE, denominado modelo dependente da frequência, é representado por dois segmentos de resistores não-lineares denominados por A0 e A1. Os dois segmentos são separados por um filtro R-L.

Para surtos onde o tempo de subida é grande, este filtro apresenta pequena impedância e os dois segmentos de varistores se comportam como se estivessem em paralelo. Para surtos rápidos de corrente, o filtro se torna mais significativo, o que resulta em mais corrente no segmento A0, do que em A1. Como a característica de A0 apresenta uma maior tensão para a mesma corrente, o resultado é que o modelo gera uma tensão maior. Devido ao fato dos varistores de óxido de zinco possuírem uma maior tensão residual para surtos rápidos de corrente, o modelo representa bem seu comportamento. O circuito correspondente é apresentado a seguir na Figura 3:

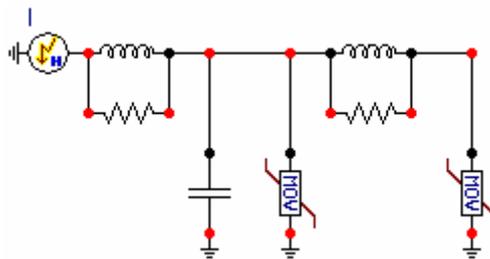


FIGURA 3 – Modelo IEEE.

A comparação dos valores de pico calculados com valores medidos, mostra que o modelo dependente da frequência apresenta bons resultados para descargas de corrente com tempo de subida entre $0,5$ e $45\mu\text{s}$. O maior problema com o modelo é como identificar os parâmetros. O grupo de trabalho sugere um procedimento iterativo onde as correções nos diferentes elementos são necessárias até se obter um comportamento satisfatório. Os valores iniciais podem ser encontrados através de fórmulas que levam em consideração tanto os dados elétricos (tensões residuais), como parâmetros físicos (altura da coluna, número de colunas paralelas).

2.5 Modelo Mandira et al

O trabalho apresenta uma simplificação do modelo proposto pelo grupo de trabalho do IEEE. Neste (5), são eliminados os elementos resistivos, bem como se propõe uma metodologia de cálculo para determinar cada um dos elementos do circuito, conforme Figura 4:

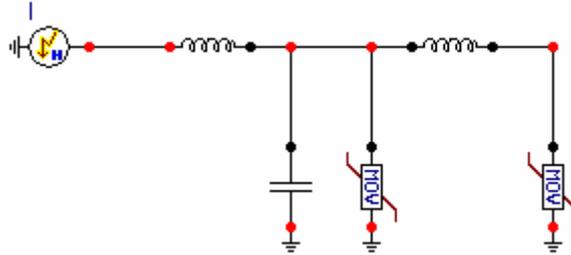


FIGURA 4 – Modelo Mandira et al.

Os autores informam que o modelo proposto apresenta um bom desempenho para correntes típicas de descargas atmosféricas com forma de onda $8 \times 20\mu s$, evitando o processo iterativo do modelo IEEE. Porém é limitado, uma vez que não se aplica a uma grande variedade de formas de onda como é desejado.

2.6 Modelo Pinceti et al

Neste modelo, também derivado do modelo do IEEE, todos os dados necessários são normalmente descritos nos catálogos dos fabricantes, não há necessidade de correção iterativa dos parâmetros e, segundo os autores, o desempenho do modelo está de acordo com o comportamento de varistores de diferentes modelos e vários fabricantes (6). Além destes fatores, a capacitância é eliminada, fazendo com que somente dados elétricos sejam utilizados. As duas resistências em paralelo com as indutâncias são substituídas por uma única resistência entre os terminais de entrada, a fim de evitar oscilações numéricas. Estas informações são mostradas na Figura 5:

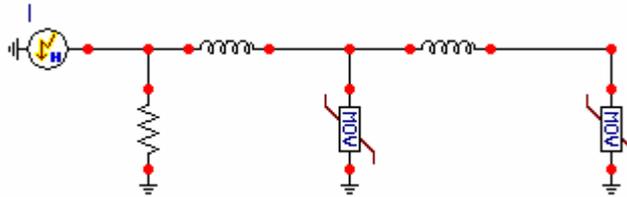


FIGURA 5 – Modelo Pinceti et al.

2.7 Modelo Fernandez et al

Uma outra simplificação do modelo IEEE é proposta, onde são necessários tanto dados físicos como elétricos. Da mesma forma, como no modelo anteriormente descrito, as resistências são substituídas por uma única em paralelo com uma capacitância. Um dos elementos indutivos é desprezado, e a definição da indutância restante é feita a partir de curvas pré-definidas, as quais dependem do aumento percentual da tensão residual e da respectiva forma de onda de corrente aplicada ao varistor. A relação entre as correntes de A0 e A1 para as mesmas tensões deve ser de 0.02 (7). A figura 6 apresenta o circuito que representa o modelo:

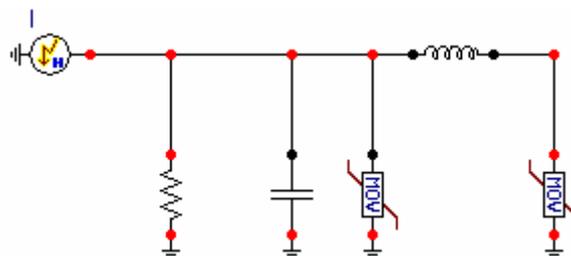


FIGURA 6 – Modelo Fernandez et al.

3.0 - IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos Convencional, IEEE, Pinceti e Fernandez, foram implementados utilizando-se a ferramenta computacional ATP – Alternative Transients Program, versão *ATPDRAW* 3.9. Os outros modelos relacionados por não apresentarem resultados satisfatórios não foram incluídos nesta análise, porém servem como referência aos esforços despendidos na busca do modelo mais adequado.

As formas de onda de corrente utilizadas nas simulações foram obtidas através do emprego da fonte 15 – Modelo de Heidler. A avaliação do uso da fonte 14 para os estudos mostra que esta não permite evidenciar o efeito da característica dinâmica onde a tensão está atrasada em relação à corrente. As demais fontes representam funções que não permitem modelar corretamente a forma de onda da corrente de entrada do modelo.

A comparação da representação de modelos de varistores de óxido de zinco no programa ATP para proteção contra sobretensões foi realizada utilizando-se os dados de um único pára-raios da ABB, cujo código é PEXLIM R060-XV072. Os dados do pára-raios utilizados para simulação dos modelos são indicados na Tabela 1 abaixo:

TABELA 1 – Dados do Pára-raios ABB código PEXLIM R060-X072.

Tensão Nominal [kV]	Corrente Nominal descarga [kA]	Altura da coluna [mm]	Tensão nominal máxima [KVpico]						
			Corrente 30x60 μ s			Corrente 8x20 μ s			Corrente 1x(2-20) μ s
			0,5 kA	1,0 kA	2,0 kA	5,0 kA	10 kA	20 kA	10 kA
60	10	736	123	127	132	143	150	166	163

4.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Apresenta-se a seguir os resultados das simulações onde foram avaliadas as respostas dos modelos apresentados para uma fonte de corrente característica que representa descargas atmosféricas com a forma de onda 8x20 μ s com pico 10 kA e 20 kA, bem como para uma frente de onda rápida de 1x2 μ s e 10 kA. Na Tabela 2 a seguir são mostrados os erros percentuais encontrados em relação ao pico de tensão dado pelo fabricante:

TABELA 2 – Resposta dos modelos para as simulações.

Modelo	8x20 μ s-10 kA		8x20 μ s-20 kA		1x2 μ s-10 kA	
	Simulação [kV]	Erro [%]	Simulação [kV]	Erro [%]	Simulação [kV]	Erro [%]
Convencional	150,00	0,00	166,00	0,00	150,00	-8,60
IEEE	149,72	0,18	163,00	-1,84	168,60	3,40
Pinceti et al	151,33	0,80	163,07	-1,79	165,35	1,40
Fernandez et al	149,92	-0,05	166,04	0,02	163,19	0,11

Os resultados das formas de onda são mostrados nas Figuras 7, 8 e 9, enquanto que o laço de histerese pode ser identificado para os modelos, exceto para o Convencional nas Figuras 10, 11, 12 e 13:

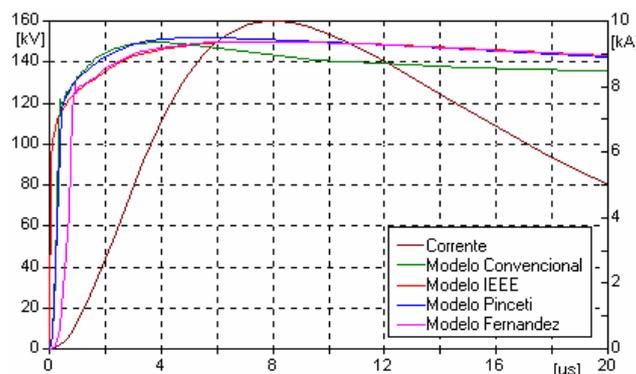


FIGURA 7 – Corrente 8x20 μ s – 10 kA.

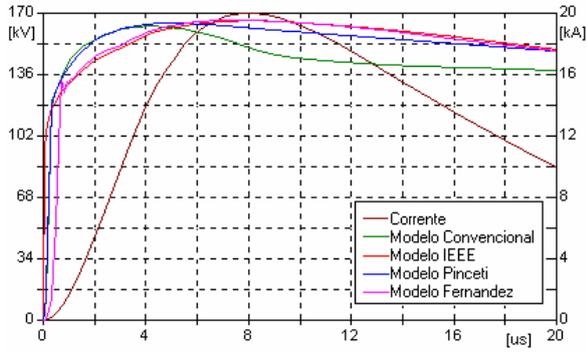


FIGURA 8 – Corrente 8x20µs – 20 kA.

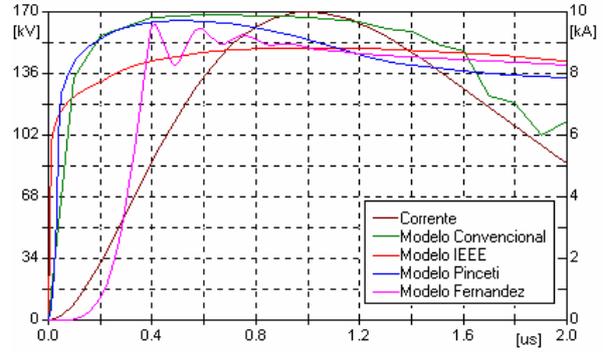


FIGURA 9 – Corrente 1x2µs – 10 kA.

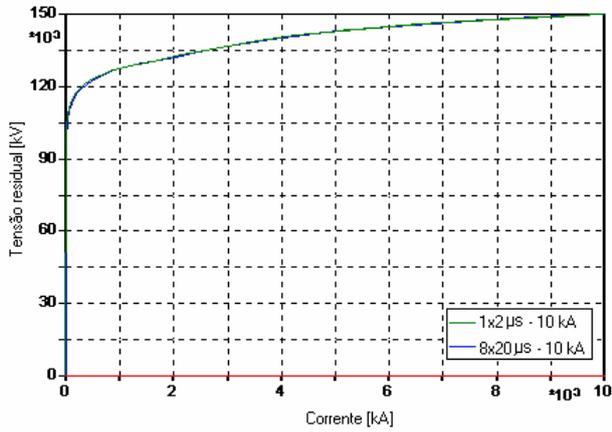


FIGURA 10 – Modelo Convencional.

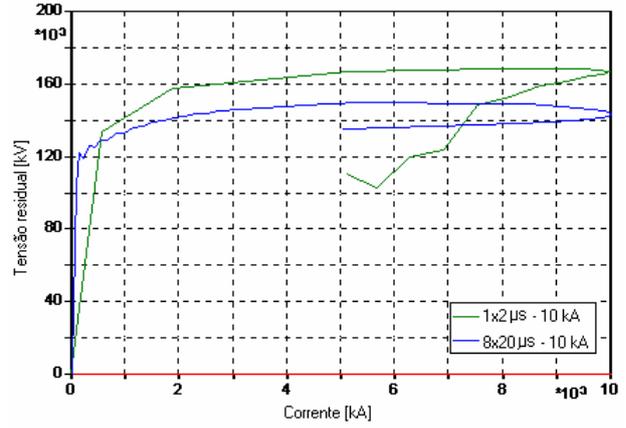


FIGURA 11 – Modelo IEEE.

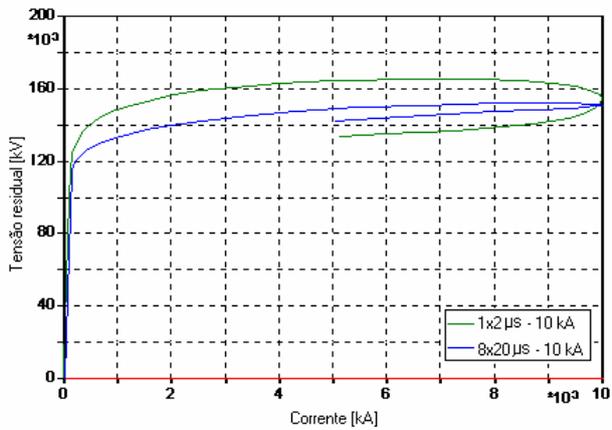


FIGURA 12 – Modelo Pinceti et al.

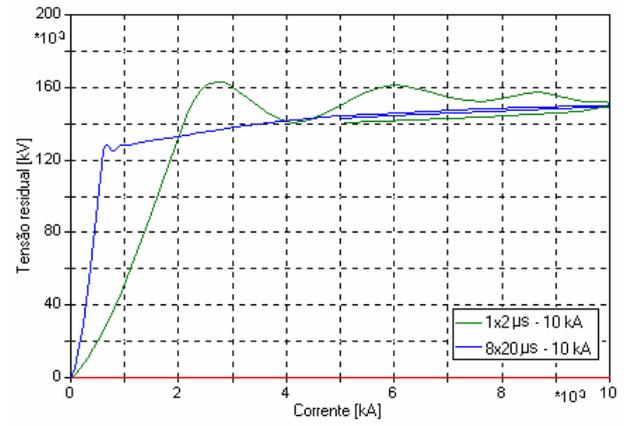


FIGURA 13 – Modelo Fernandez et al.

A fim de ilustrar melhor os resultados apresentados nas figuras anteriormente apresentadas, a Tabela 3 a seguir informa os instantes de tempo de pico de tensão para cada forma de onda de corrente aplicada aos terminais dos varistores:

TABELA 3 – Instantes de tempos de pico de tensão para os modelos.

Modelo	8x20 μ s-10 kA	8x20 μ s-20 kA	1x2 μ s-10 kA
	Tempo [μ s]	Tempo [μ s]	Tempo [μ s]
Convencional	8,00	8,00	1,00
IEEE	3,80	4,20	0,60
Pinceti et al	5,35	4,98	0,52
Fernandez et al	7,43	7,52	0,41

Dos dados apresentados, observa-se que o modelo Convencional não representa adequadamente a característica dinâmica do pára-raios, motivo pelo qual não se observa o laço de histerese na relação tensão-corrente na Figura 10. A análise das Tabela 2 e 3 evidencia o fato de que para um surto com tempo de frente de onda da ordem de 1 μ s, o valor da tensão residual é o mesmo para o tempo de 8 μ s, e que os valores máximos de tensão e corrente ocorrem no mesmo instante.

O modelo IEEE apresenta bons resultados, porém com maiores erros percentuais para frentes de ondas rápidas se comparado com os modelos Pinceti e Fernandez. O fato de necessitar de dados físicos e cálculo iterativo dos parâmetros faz com que este seja um pouco trabalhoso. Neste modelo, bem como nos outros descritos a seguir observa-se o laço de histerese para a relação tensão-corrente, bem como o atraso da corrente em relação à tensão.

Os resultados apresentados pelo modelo Pinceti são bastante satisfatórios ao representar a característica dinâmica do pára-raios. O fato de somente necessitar de parâmetros elétricos para construir o circuito elétrico correspondente e de não precisar de correções iterativas tornam o modelo bastante atraente do ponto de vista de esforço computacional e disponibilidade de dados por parte dos fabricantes.

O modelo Fernandez também apresenta bons resultados, com pequeno erro percentual. A maior dificuldade é a escolha do valor da indutância do modelo, pois a mesma depende da representação de curvas que relacionam o tempo de frente de onda com o aumento percentual da tensão residual descritas no referido artigo.

Esta dificuldade pode ser resolvida por um processo iterativo semelhante ao apresentado no IEEE, o que torna o modelo um pouco mais trabalhoso.

5.0 - CONCLUSÃO

Foram apresentados diversos modelos para representação da característica dinâmica do pára-raios frente a surtos de corrente, com tempo de subida variando de 1 a 8 μ s e para diferentes valores de pico da corrente aplicada aos terminais do varistor. Outros modelos que não apresentam bons resultados neste estudo não foram incluídos nesta avaliação.

Os modelos comparados com o Convencional apresentaram pequenos erros percentuais, o que demonstrou a sua eficácia. Os maiores erros percentuais para uma forma de onda de corrente rápida foram evidenciados no modelo Convencional e IEEE. A ocorrência do pico de tensão antes do pico de corrente foi verificado em todos os modelos simulados, exceto o modelo Convencional.

A disponibilidade de dados por parte dos fabricantes, bem como o esforço computacional associado podem levar à utilização de um ou outro modelo apresentado.

Verificou-se também que para estudos nos quais a frente de onda é lenta, como, por exemplo, surtos de manobra, o modelo Convencional é suficiente para a representação do pára-raios.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM RULE BOOK, Can/Am EMTP User Group, USA, 1997.
- (2) IEEE WORKING GROUP 3.4.11, Modeling of metal oxide surge arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp. 302-309, 1992.
- (3) TOMINAGA, S., AZUMI, K., SHIBUYA, Y., IMATAKI, M., FUJIWARA, Y., NICHIDA, S., Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic v-i characteristics , IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, pp. 1860-1871, 1979.
- (4) KIM, I., FUNABASHI, T., SASAKI, H., HAGIWARA, T., KOBAYASHI, M.; Study of ZnO arrester model for steep front wave, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N° 2, pp. 834-841, April, 1996.
- (5) MARDIRA, K. P., SAHA, T. K. A simplified lightning model for metal oxide surge arrester; The University of Queensland – Austrália.
- (6) PINCETI, P., GIANNETTONI, M., A simplified model for zinc oxide surge arresters , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 2, pp.393-398, 1999.
- (7) FERNANDEZ F., DIAZ R., Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations" paper 144, International conference on power system transients, IPST'01, 20 -24 June 2001.