



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

FI/GDS/13  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**ANÁLISES CRÍTICA E REFLEXIVA DE MODELOS DE PARA-RAIOS PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**Marco A. O.  
Schroeder**

**Rodolfo A.  
R. Moura**

**Bernardo  
N. Giarola**

**Ítalo A.J. W.S.  
Meireles**

**Warley S.  
Sales**

**Luiz C.  
Nascimento**

**Sandro C. Assis**

**Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL)  
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)**

**Cemig  
Distribuição  
(CEMIG-D)**

**RESUMO**

Linhas de transmissão em regiões com altas taxas de incidência de descargas atmosféricas e em solos com resistividades elevadas apresentam desempenho insatisfatório, pois níveis elevados de sobretensões serão estabelecidos, por exemplo, nas cadeias de isoladores. Para amenizar estes nefastos efeitos e, desta forma, melhorar seu desempenho frente às descargas atmosféricas, é necessária a instalação de equipamentos de proteção. Uma alternativa típica corresponde à colocação de para-raios ZnO em paralelo com a cadeia de isoladores. Este artigo aborda esta importante temática, com ênfase na modelagem do para-raios. Os resultados alcançados ilustram resultados distintos para diferentes modelagens.

**PALAVRAS-CHAVE:** Para-Raios, Sobretensões Atmosféricas, Transitórios Eletromagnéticos, EMTP/ATP.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os percursos de linhas de transmissão aéreas envolvem, muitas das vezes (principalmente em países que possuem elevada extensão territorial, como o Brasil), regiões de características orográficas bastante diversificadas. Em muitos casos, alguns trechos destas linhas estão inseridos em locais que apresentam altas taxas de incidência de descargas atmosféricas e em solos com elevados valores de resistividade elétrica. Esta combinação é extremamente danosa para a linha quanto ao seu desempenho em relação às descargas atmosféricas, pois de um modo geral suas taxas de desligamento (tanto por *backflashover*, quanto por *flashover*) serão substancialmente elevadas.

Naturalmente, o efeito de altas incidências promove o estabelecimento de constantes transitórios eletromagnéticos indesejados no sistema de transmissão. Concomitantemente, as elevadas resistividades elétricas do solo subjacente à linha acarretam em impedâncias impulsivas, do aterramento elétrico das torres de transmissão, também elevadas.

Estes dois fatores geram distribuições temporais de sobretensões que solicitam de forma severa, por exemplo, as cadeias de isoladores, promovendo um arco elétrico que, após o término dos efeitos das descargas atmosféricas, pode ser mantido, sob a ação da tensão de regime permanente. Tal processo culminará, evidentemente, no estabelecimento de curto circuito na linha de transmissão.

Para amenizar estes nefastos efeitos eletromagnéticos e, desta forma, melhorar o desempenho da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas, é necessária a instalação de equipamentos de proteção. Um exemplo de equipamento que pode ser colocado em paralelo com a cadeia de isoladores são os para-raios de óxido de zinco (ZnO). Devido às complexidades do fenômeno descrito, os níveis de sobretensões atmosféricas são normalmente calculados por meio da utilização de ferramentas computacionais dedicadas a estudos de transitórios eletromagnéticos, tais como, *EletroMagnetic Transients Program* (EMTP), *Power Systems Computer Aided Design* (PSCAD), dentre outras.

(\*) Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Praça Frei Orlando, 170 – Centro – CEP: 36.307-352, Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL), São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil, e-mail: schroeder@ufs.edu.br

Neste contexto, um estudo de fundamental importância refere-se à correta modelagem do elemento para-raios, que deve ser capaz de absorver altos níveis de energia. As principais modelagens de para-raios divulgadas na literatura são as seguintes: i) modelo convencional; ii) modelo proposto pelo IEEE; iii) modelo proposto por Pinceti-Gianettoni e iv) modelo proposto por Fernandez-Díaz.

Este artigo apresenta um estudo na temática citada acima, uma vez que visa avaliar, de forma crítica e reflexiva, os modelos supracitados e suas aplicações em linhas de transmissão para melhoria de seu desempenho frente a descargas atmosféricas. Para a adequada realização de tais avaliações utiliza-se o *Alternative Transients Program* (ATP).

## 2.0 - DESENVOLVIMENTOS

Modelos são aproximações da realidade e de características de interesse dessa realidade e, normalmente, modelos mais complexos resultam em resultados mais realísticos. Com o intuito de modelar o varistor (para-raios) de ZnO, deve-se obter diversas informações do fabricante, onde o mesmo deve ser caracterizado com alta impedância em regime permanente e baixa impedância em situações de distúrbios eletromagnéticos.

Para que o varistor tenha a característica supracitada, o mesmo deve ter uma relação tensão *versus* corrente não linear. Contudo, os varistores possuem uma característica dinâmica dependente da frequência [1]. Com o propósito de comparar alguns modelos existentes na literatura, estão presentes nesse trabalho três metodologias diferentes para modelagem de para-raios: i) Modelo convencional, representado por um resistor não linear; ii) Modelo proposto pelo grupo de pesquisa do IEEE e iii) Modelo proposto por Pinceti-Gianettoni. O modelo proposto por Fernandez-Díaz não foi abordado nesse trabalho pois, segundo [1], sua metodologia somente é válida para para-raios de baixa e média tensão.

### 2.1 Modelo Convencional

Para estudos de sistemas elétricos existem diversos programas difundidos na literatura; entre eles encontram-se os programas da família EMTP e EMTDC. Dentro dos programas da família EMTP existe o mundialmente divulgado ATP, que tem a característica de ser gratuito. Ademais, dentro da biblioteca do ATP há um modelo não linear de resistência que em muitos casos é utilizado para a modelagem de varistores de ZnO.

De acordo com [2], o varistor de ZnO é modelado a partir de um sistema de ajuste conhecido anteriormente como *ZnO Fitter*, onde o mesmo ajusta os parâmetros da Equação (1) para modelagem do para-raios.

$$i = p * (V / V_{ref})^q \quad (1),$$

onde:  $i$  é a corrente do para-raios;  $v$  é a tensão sobre a qual o para-raios está submetida;  $p$  e  $q$  são constantes a serem calculadas pelo *ZnO Fitter* e  $V_{ref}$  é a tensão de referência, normalmente selecionada como duas vezes a tensão nominal de operação do sistema.

Para a corrente no para-raios não ultrapassar o valor de 0,1 A e haver um aumento considerável na velocidade de processamento do sistema, o mesmo opera como um elemento linear para tensões abaixo dos valores definidos como referência. A Figura 1 mostra a representação do modelo no *software* ATP.



Figura 1 - Resistor não linear representativo do para-raios de ZnO - MOV type 92.

### 2.2 Modelo proposto pelo IEEE

Com intuito de modelar o para-raios com suas características dinâmicas o Grupo de Trabalho 3.4.11 de 1971 do IEEE (técnicas de modelagem de para-raios frente a transitórios) apresentou um modelo capaz de caracterizar a dinâmica do para-raios [3].

Para uma dada magnitude de corrente de descarga, a tensão sobre o para-raios pode variar em torno de 6 % quando são comparadas duas descargas de frentes de ondas de 6 e 1,3  $\mu$ s [3]. Esse modelo, segundo o IEEE, é válido para frentes de ondas variando de 0,5  $\mu$ s até 40  $\mu$ s.

Esse modelo é representado por dois elementos não lineares separados por um filtro passa baixas, onde em frentes de ondas lentas os dois elementos são representados pelo seus paralelos e em frentes de ondas rápidas a parcela representativa do primeiro elemento não linear é mais evidente.

A Figura 2 mostra o circuito equivalente proposto para esse caso. A indutância  $L_0$  modela o campo magnético na vizinhança imediata do para-raios. A resistência  $R_0$  é obtida com intuito de estabilizar numericamente o modelo. A

capacitância  $C$  modela o campo elétrico entre os terminais do para-raios. Os parâmetros  $L1$  e  $R1$  estão relacionados com o filtro entre os elementos não lineares  $A0$  e  $A1$ .

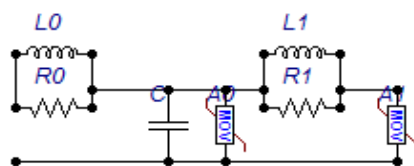


Figura 2 - Representação do Circuito Equivalente proposto pelo grupo de Trabalho do IEEE

A obtenção dos valores dos parâmetros é apresentada a seguir, onde para tal é realizado um processo iterativo. Esse modelo, além de levar em conta os parâmetros eletromagnéticos do fenômeno, contabiliza os parâmetros mecânicos. Isso é evidente no cálculo dos valores iniciais desses parâmetros.

Segundo [3], os passos para determinação dos parâmetros são:

- 1) Obter os valores iniciais de  $L0$ ,  $R0$ ,  $L1$ ,  $R1$ ,  $C$  e as características iniciais de  $A0$  e  $A1$  de acordo com as Equações (2) a (6) e com os valores iniciais propostos para  $A0$  e  $A1$  na Tabela 1.
- 2) Ajustar os valores em p.u. dos elementos  $A0$  e  $A1$  para frentes de ondas lentas (com tempo de frente próximas de  $45 \mu s$ ).
- 3) Ajustar o valor de  $L1$  para frentes de ondas rápidas ( $8/20 \mu s$ ).

$$L1 = 15d / n \text{ } [\mu H] \quad (2)$$

$$L0 = 0,2d / n \text{ } [\mu H] \quad (3)$$

$$R1 = 65d / n \text{ } [\Omega] \quad (4)$$

$$R1 = 100d / n \text{ } [\Omega] \quad (5)$$

$$C = 100n / d \text{ } [pF] \quad (6)$$

Tabela 1 - Característica  $V \times I$  dos resistores  $A0$  e  $A1$ . Valores iniciais.

Corrente [A]	A0 [Tensão P.U.]	A1 [Tensão P.U.]
10	1,4	-
100	1,54	1,23
1000	1,68	1,36
2000	1,74	1,43
4000	1,8	1,48
6000	1,82	1,5
8000	1,87	1,53
10000	1,9	1,55
12000	1,93	1,56
14000	1,97	1,58
16000	2	1,59
18000	2,05	1,6
20000	2,1	1,61

### 2.3 Modelo proposto por Pinceti e Giannettoni

Os pesquisadores Pinceti e Giannettoni, em 1999, apresentaram algumas pequenas simplificações do modelo proposto pelo grupo do IEEE. Segundo [4], o comportamento capacitivo do para-raios para o fenômeno descarga atmosférica pode ser eliminado. Desta forma, neste modelo a capacitância ( $C$ ) é retirada. Adicionalmente, as resistências paralelas dos dois indutores são substituídas por uma em paralelo com o sistema completo de  $1 \text{ M}\Omega$ , apenas com o intuito de eliminar problemas numéricos. A Figura 3 ilustra o circuito equivalente proposto pelos pesquisadores.

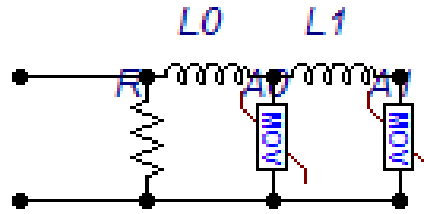


Figura 3 - Representação do Circuito Equivalente proposto por Pinceti

O princípio de operação é similar ao do IEEE, onde as características não lineares dos elementos A0 e A1 são derivadas do modelo do IEEE. Esses valores são apresentados na Figura 4, onde a tensão base do sistema é a informada no catálogo de fabricante para um ensaio de 10 kA com tempo de frente de 8  $\mu$ s e tempo de calda de 20  $\mu$ s. Os valores de L1 e L0 estão presentes nas Equações (7) e (8).

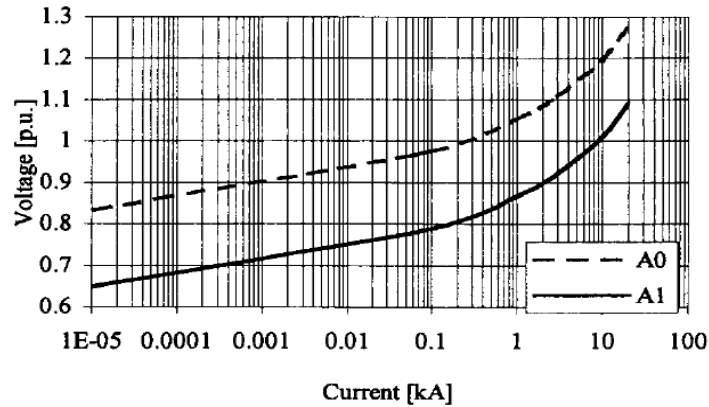


Figura 4 - Curva V x I não linear dos elementos A0 e A1. Adaptado de [4].

$$L1 = 1/4 * \frac{(V_{r1/T2} - V_{r8/20})}{V_{r8/20}} V_n \text{ } [\mu\text{H}] \quad (7),$$

$$L0 = 1/3 * L1 \quad (8),$$

onde  $V_n$  é a tensão nominal do para-raios;  $V_{r1/T2}$  é a tensão residual no para-raios para uma corrente de 10 kA e frente de onda de 1  $\mu$ s.  $V_{r8/20}$  é a tensão residual no para-raios para uma corrente de 10 kA com tempo de frente de 8  $\mu$ s e tempo de calda de 20  $\mu$ s.

### 3.0 - RESULTADOS

Com intuito de simular um sistema real, os resultados são divididos em duas partes. A primeira apresenta os parâmetros do para-raios utilizado, retirado de folha de dados de para-raios reais e a segunda mostra a influência de cada metodologia no transitório final de uma descarga atmosférica atingindo uma torre de transmissão.

O para-raios utilizado para o sistema em questão é o da ABB, PEXLIM R para tensão nominal de 138 kV e tensão máxima do sistema de 145 kV. Os valores dos seus dados podem ser encontrados nos documentos [5] [6], amplamente divulgados na literatura. Além disso, o sistema de transmissão base é uma linha de 138 kV solicitada por uma descarga atmosférica; a Figura 5 ilustra esse sistema. A impedância impulsiva do aterramento elétrico da torre é modelada mediante uma resistência concentrada de valor 40  $\Omega$ . As dimensões da torre e as características dos condutores que compõem a linha de transmissão estão enumeradas na Tabela 2.

#### 3.1 Parâmetros dos Modelos

Os modelos presentes nesse trabalho apresentam metodologias de cálculo de seus parâmetros conforme descrito na seção 2. Assim, a Tabela 3 mostra os valores dos parâmetros para cada metodologia e as Tabelas 4 e 5 esboçam os dados da curva V versus I dos elementos não lineares A0 e A1 da metodologia do IEEE e de Pinceti, respectivamente.

Tabela 2 - Parâmetros Geométricos da Linha de Transmissão de 138 kV – Caso Base.

Tensão Operacional	138 kV	Altura Condutores Para-Raios	23,3 m
Número de Condutores/Fase	1	Diâmetro de Condutores fase	18,31 mm
Números de Cabos Para-Raios	1	Diâmetro de Condutores Para-Raios	9,14 mm
Altura Fase A	17,7 m	Posição Horizontal Fase A e C	3 m
Altura Fase B	14,2 m	Posição Horizontal Fase B	-3 m
Altura Fase C	10,7 m	Posição Horizontal Cabo Para-Raios	0

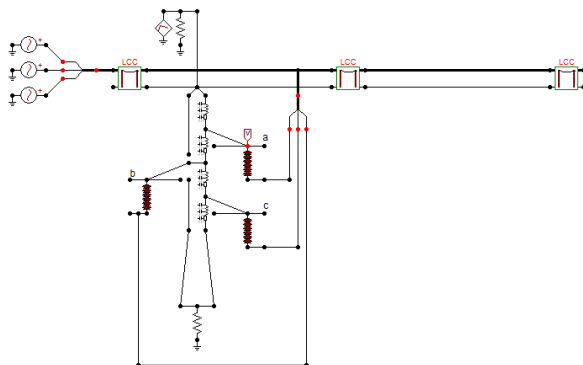


Figura 5 – Linha de transmissão utilizada como caso base.

Tabela 3 - Parâmetros dos elementos Lineares dos Modelos IEEE e Pinceti.

Modelo	Parâmetros dos Circuitos Equivalentes				
	L1 [mH]	R1 [ $\Omega$ ]	L0 [mH]	R0 [ $\Omega$ ]	C [ $\mu$ F]
IEEE	0,0225	90,22	0,0002776	138,8	7,20461E-05
Pinceti	0,003105	1000000	0,001035	-	-

Tabela 4 – Dados dos Elementos não Lineares do IEEE.

Corrente [A]	A0 [Tensão V]	A1 [Tensão V]
10	313250	-
100	344575	275212,5
1000	375900	304300
2000	389325	319962,5
4000	402750	331150
6000	407225	335625
8000	418412,5	342337,5
10000	425125	346812,5
12000	431837,5	349050
14000	440787,5	353525
16000	447500	355762,5
18000	458687,5	358000
20000	469875	360237,5

Tabela 5 – Dados dos Elementos não Lineares do Pinceti.

Corrente [A]	A0 [Tensão V]	A1 [Tensão V]
0,002	289980	223034
100	348692	282104
1000	376616	310028
3000	396664	330076
10000	427810	361222
20000	457166	390578

Ademais, antes de incluir os para-raios no caso base, foi feito um estudo da inserção deste elemento em diversas formas de ondas de corrente, com a respectiva determinação da máxima tensão residual no para-raios. A Tabela 6 mostra os resultados das simulações comparados com os valores fornecidos pelo fabricante. Como pode ser verificado na Tabela 6 os modelos apresentam características diferenciadas para frentes de onda mais lentas e para frentes de onda mais rápidas. O modelo convencional apresenta pequeno desvio para ondas mais lentas. Contudo, para os casos mais rápidos o mesmo começa a divergir os resultados. O modelo proposto pelo grupo de trabalho do IEEE apresenta, para as amostras da Tabela 6, o menor erro acumulado. Todavia, para a fonte de corrente com frente de onda mais rápida ele apresentou o maior erro percentual. Por fim, o modelo de Pinceti resultou no maior erro acumulado, mas para as situações mais rápidas ele apresentou o melhor desempenho.

Tabela 6 - Máxima Tensão Residual do para-raios PEXLIM R.

Corrente [kA]	Datasheet [kV]	Convencional [kV]	erro [%]	IEEE [kV]	erro [%]	Pinceti [kV]	erro [%]
0,5 (30/60us)	284	283	0,352112676	284	0	301	-5,98592
1 (30/60us)	295	296	-0,338983051	294	0,3389831	310	-5,08475
2 (30/60us)	309	309	0	309	0	323	-4,53074
5 (8/20us)	338	337	0,295857988	335	0,887574	345	-2,07101
10 (8/20 us)	358	359	-0,279329609	358	0	365	-1,95531
20 (8/20 us)	401	382	4,738154613	388	3,2418953	394	1,745636
5 (1/5 us)	354,9	337	5,043674274	376	-5,945337	361	-1,71879

### 3.2 Comparação entre os modelos no caso base

Para avaliar a influência dos para-raios nas sobretensões atmosféricas, é considerada uma onda de corrente do tipo dupla rampa (modelo indicado pelo IEEE), com pico de corrente em torno de 16 kA, tempo de frente de 1  $\mu$ s e tempo de cauda de 50  $\mu$ s (ver Figura 6). Os dados supracitados foram tirados de valores medianos obtidos na Estação de Medição de Descargas Atmosféricas da Torre do Morro do Cachimbo em Belo Horizonte para ondas de corrente subsequentes [7].

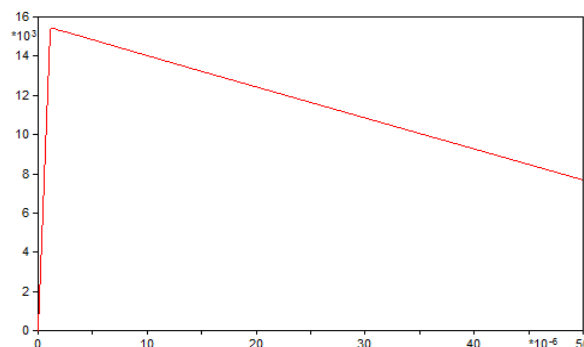


Figura 6 - Corrente de Retorno de ondas subsequentes.

Com intuito de comparar os modelos dos para-raios, aloca-se o mesmo em paralelo com a cadeia de isoladores e obtém-se a tensão da fase A (caso de maior sobretensão). Ademais, verifica-se a sobretensão para o mesmo sistema de aterramento em dois solos com resistividade diferentes: i) 100  $\Omega$ .m e ii) 10.000  $\Omega$ .m.

Segundo [8] e [9] para o tipo de aterramento elétrico da linha de transmissão sob estudo o cabo contrapeso é de aproximadamente 30 metros. Assim, para o solo de 100  $\Omega$ .m o aterramento possui impedância impulsiva de 70  $\Omega$ , enquanto que para solo de 10.000  $\Omega$ .m a impedância impulsiva está em torno de 360  $\Omega$ .

Ademais, segundo [10] a cadeia de isoladores tem um comprimento de 1,314 metro e a curva  $V$  versus  $t$  da cadeia de isoladores é dada pela Equação (9). De acordo com a literatura, caso a sobretensão na cadeia de isolador ultrapasse o valor da curva, a mesma está susceptível a ocorrência de um arco elétrico, ocasionando em um curto-circuito fase/terra.

$$V_f(t) = (400 + 710/t^{0.75})W \text{ [kV]} \quad (9),$$

onde:  $V_f$  é a tensão de *flashover* (kV);  $t$  é o tempo para *flashover* ( $\mu$ s) e  $W$  é o comprimento da cadeia de isoladores (m).

A Figura 7 mostra o valor das sobretensões atmosféricas na fase A para torre sem para-raios e para torre com para-raios de acordo com cada metodologia proposta nesse trabalho. A parte (a) desta figura corresponde aos resultados para solos de 100  $\Omega$ .m, enquanto a (b) para solos de 10.000  $\Omega$ .m. Além disso, em vermelho tem-se a curva  $V \times t$  da cadeia de isoladores.

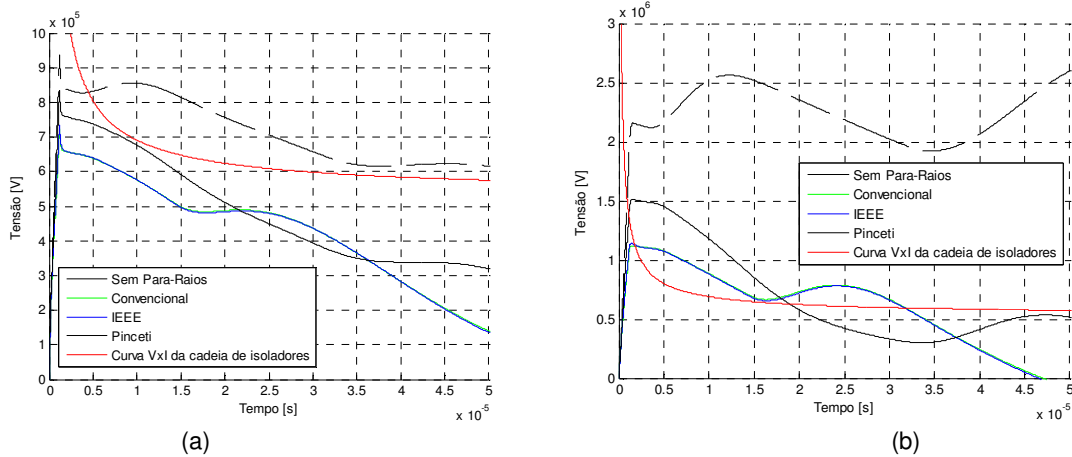
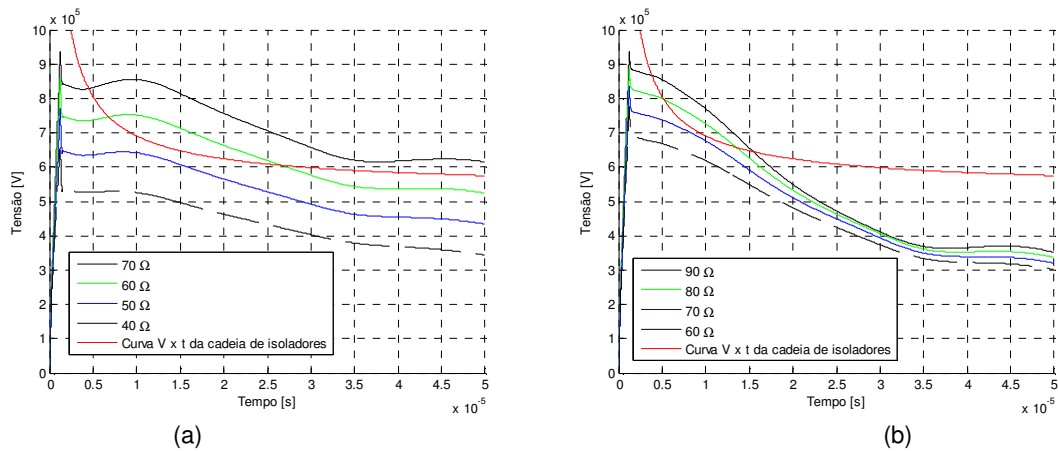
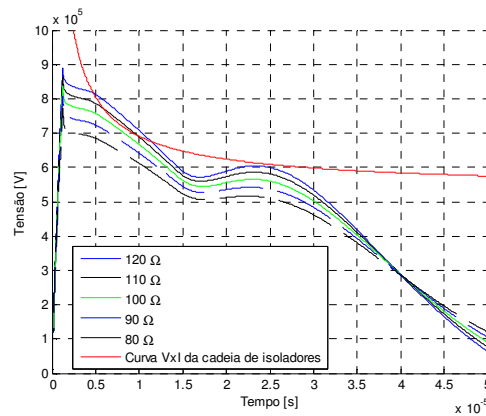


Figura 7 – Sobretensão atmosférica na fase A e curva  $V \times t$  da cadeia de isoladores. (a) solo com resistividade igual a 100  $\Omega$ .m e (b) solo com resistividade igual a 10.000  $\Omega$ .m.

Como pode-se perceber, para o caso de solo com resistividade de 100  $\Omega$ .m (Figura 7 (a)), caso haja uma ocorrência de descarga atmosférica no topo da torre e não exista para-raios, haverá a saída indesejada dessa linha de transmissão. Contudo, até mesmo para o modelo proposto por Pinceti (modelo mais conservativo), existirá proteção da linha, não deixando com que a mesma seja desligada. Contudo, para o caso de solo com resistividade elevada (Figura 7 (b)), independentemente da instalação de para-raios, haverá o desligamento da linha de transmissão.

Visto o exposto anterior, é interessante então observar a partir de qual valor de impedância impulsiva ocorrerá a saída da linha de transmissão para o caso em estudo. A Figura 8 (a) contempla diversas curvas de sobretensões atmosféricas sem a presença de para-raios, ao passo que as Figuras 8 (b) e (c) ilustram os mesmos resultados com a instalação de para-raios modelados, respectivamente, pelos trabalhos de Pinceti e IEEE.





(c)

Figura 8 – Sobretensões atmosféricas na fase A para diversas impedâncias impulsivas de aterramento: (a) sem para-raios e (b) com para-raios mediante o modelo de Pinceti e (c) com para-raios e modelo IEEE.

Observa-se que, com base na Figura 8 (a), para os casos em que os aterramentos elétricos possuam impedâncias impulsivas acima valor de 50  $\Omega$  o processo de ruptura na cadeia de isoladores fará com que a linha saia de operação. Por outro lado, este valor limite de impedância aumenta para 70  $\Omega$  no caso da instalação de para-raios em paralelo com a cadeia de isoladores. Este valor é ainda maior quando o para-raios é considerado pelo modelo do IEEE, qual seja, 100  $\Omega$ .

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo aborda a questão relativa à modelagem eletromagnética de para-raios de linhas de transmissão de 138 kV e seus efeitos nas distribuições temporais de sobretensões atmosféricas estabelecidas nas cadeias de isoladores de linhas de transmissão. São utilizados três modelos de para-raios: convencional, IEEE e de Pinceti e Giannettoni. Considera-se que a descarga atmosférica incide no topo de linha de transmissão. Adicionalmente, são considerados solos de resistividades baixa (100  $\Omega.m$ ) e alta (10.000  $\Omega.m$ ).

Os resultados ilustram que de um modo geral: i) os modelos de para-raios estudados neste trabalho apresentam variações consideráveis nos resultados, especialmente para o modelo proposto por Pinceti. Pode-se perceber que, em todos os casos analisados neste artigo, este modelo acarreta valores superiores de sobretensão em relação aos demais; ii) os modelos convencional e do IEEE acarretam distribuições temporais de sobretensões atmosféricas muito similares (em termos práticos, as diferenças são desprezíveis); iii) para a linha de transmissão utilizada neste estudo e sistemas de aterramento com impedâncias impulsivas acima de 50  $\Omega$ , a inexistência de para-raios acarreta o desligamento da mesma; iv) considerando o modelo de para-raios de Pinceti, para solos com altos valores de impedância impulsiva (acima de 70  $\Omega$ ) a linha de transmissão sofre o desligamento, mesmo com a instalação de para-raios. Com a modelagem do para-raios via trabalho do IEEE, a linha estará protegida mesmo para aterramentos com impedâncias impulsivas superiores a 70  $\Omega$ , sendo o valor limite igual a 100  $\Omega$ . Este fato ilustra a fundamental importância da modelagem do para-raios a ser utilizada em estudos de transientes eletromagnéticos e sobretensões atmosféricas.

Naturalmente, as conclusões descritas acima não podem ser generalizadas (pelo menos em termos quantitativos), pois foram obtidas para uma configuração específica de linha de transmissão. No entanto, tem-se a expectativa de que pesquisas desta natureza como as relatadas neste estudo, possam subsidiar engenheiros eletricitistas que trabalham na área de coordenação de isolamento de linhas de transmissão, auxiliando-os, por exemplo, na especificação de para-raios para melhoria do desempenho frente às descargas atmosféricas.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Meister, Modelagem de Varistor de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento, Brasília/DF: Dissertação de Mestrado - Programa de pós Graduação em Engenharia Elétrica - PPGENE, 2005.
- [2] EMTP RuleBook.
- [3] IEEE, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, nº 1, pp. 302 - 309, 1992.
- [4] P. Pinceti e M. Giannettoni, "A Simplified model for zinc oxide surge arrester," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, nº 2, pp. 393 - 398, 1999.
- [5] S. A. ABB, "Buyer's Guide, Edition 8," Ludvika, Sweden, 2009.
- [6] T. I. ABB, "TOV Capability and Protective Characteristics for Surge Arresters Type EXLIM and PEXLIM," Ludvika, Sweden, 2004.



- [7] S. Visacro, A. Soares, M. A. O. Schroeder, L. C. L. Cherchiglia e V. J. Sousa, "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station," *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, 2004.
- [8] A. G. Pedrosa, Comportamento Transitório de Eletrodos de Aterramento Considerando a Variação da Condutividade e Permissividade Elétricas de Solos Típicos com a Frequência, Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Programa de Pós-graduação CEFET/UFSJ, 2011.
- [9] J. A. S. Mariano, Um Ambiente Computacional Para Cálculo de Sobretensões Atmosféricas e Desempenho de Linhas de Transmissão Segundo Uma Abordagem Estocástica, São João del-Rei: Dissertação de Mestrado Engenharia Elétrica - Programa de Pós-graduação UFSJ/CEFET-MG, 2012.
- [10] A. T. Lobato, Análise da Falha de Blindagem em Linhas de Transmissão Aéreas de Transmissão Segundo Abordagens Determinísticas e Estocásticas, São João del-rei: Dissertação de Mestrado Engenharia Elétrica - Programa de pós-graduação UFSJ/CEFET-MG, 2014.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Marco Aurélio de Oliveira Schroeder:** nasceu em Cataguases-MG, em novembro de 1968. Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP) e Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). É líder do Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), cadastrado na base do CNPq, e Coordenador do Laboratório Integrado de Pesquisas Eletromagnéticas (LAIPE) do DEPEL/UFSJ. Atua nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Técnicas de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento.

**Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura:** nasceu em Pará de Minas-MG, em março de 1990. Possui Graduação e Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSJ. Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). É professor assistente do DEPEL/UFSJ. É membro do GATCI. Atua nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Coordenação de Isolamento.

**Ítalo Arthur João Wilson Silva Mireles:** nasceu em Timóteo-MG, em junho de 1988. Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela UFSJ e atualmente cursa o Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSJ. É professor do Departamento de Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), campus IX. Atua nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Descargas Atmosféricas e Coordenação de Isolamento.

**Bernardo Nogueira Giarola:** nasceu em São João del-Rei-MG, em julho de 1986. Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela UFSJ e cursa o mestrado na mesma universidade. É analista pleno de engenharia de produto na FCA - *Fiat Chrysler Automobiles*. Atua nas áreas de eletromagnetismo aplicado e compatibilidade eletromagnética.

**Luiz Carlos do Nascimento:** nasceu em São Paulo-SP, em abril de 1980. Possui Graduação em Engenharia Elétrica e Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). É professor adjunto do DEPEL/UFSJ. É membro do GATCI e Chefe do DEPEL/UFSJ. Atua nas seguintes áreas: Planejamento e operação de Sistemas Elétricos de Potência.

**Warley de Sousa Sales:** nasceu em Timóteo-MG, em janeiro de 1980. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFSJ e mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Itajubá. Atualmente é professor adjunto do DEPEL/UFSJ. Atua na área de operação e planejamento de sistemas elétricos de potência.

**Sandro de Castro Assis:** nasceu em Coronel Fabriciano, em setembro de 1980. Possui Graduação e Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFMG. Atualmente, é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFMG e é Engenheiro Eletricista de Projetos de Sistemas Elétricos de Linhas de Transmissão e Subestações da Cemig Distribuição.