XVIII ERIAC
DÉCIMO OITAVO ENCONTRO
REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE

Foz do Iguaçu, Brasil

19 a 23 de maio de 2019

CE-NN

Comitê de Estudos C4 – Desempenho de sistemas elétricos

A INFLUÊNCIA DA ESCOLHA DO MODELO DE PARA-RAIOS NOS ESTUDOS DE MELHORIA DE DESEMPENHO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

M. J. B. B. Davi*
Conprove Indústria
Brasil

P. S. P. Junior
Conprove Indústria
Brasil

G. S. Salge
Conprove Indústria
Brasil

C. M. Martins
Conprove Indústria
Brasil

P. S. Pereira
Conprove Engenharia
Brasil

G. E. Lourenço
Conprove Engenharia
Brasil

Resumo *– O trabalho irá estudar a modelagem de para-raios em softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos e a comparação dos principais modelos disponíveis na literatura através de estudos de caso. O software utilizado neste artigo é de origem brasileira, direcionado à simulação de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos e oferece diversos recursos que irão facilitar os estudos deste trabalho. Serão estudados os modelos: Convencional, IEEE, Pinceti-Giannettoni e Fernandez-Diaz; objetivando ressaltar as vantagens e desvantagens de cada proposta e as dificuldades encontradas na modelagem e parametrização de cada uma delas. Os modelos em estudo serão parametrizados a partir dos dados de um para-raios real e, após submetê-los a diferentes tipos de descargas atmosféricas, serão levantadas as respostas de tensão por tempo (V x t) para obtenção da tensão residual máxima e tensão por corrente (V x I) para verificação do comportamento dinâmico dos mesmos. Os resultados obtidos serão confrontados com os valores especificados em catálogo, visando avaliar a exatidão dos modelos. Será também avaliada a influência dos vários modelos de para-raios na mitigação das sobretensões atmosféricas resultantes de descargas em uma linha de transmissão de alta tensão e o consequente transitório experimentado por uma subestação próxima ao local de ocorrência da contingência.*

Palavras-chave: Transitórios, Linha de Transmissão, Para-raios, Alta Tensão, Simulação, PS Simul.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de sobretensões devido, principalmente, a descargas atmosféricas no sistema elétrico de potência (SEP) pode resultar desde falhas na operação até sérios danos aos equipamentos que o compõem. Dessa forma, torna-se imprescindível o estudo detalhado destes fenômenos para assegurar a confiabilidade na operação do sistema. Neste contexto, os para-raios têm desempenhado importante papel devido sua capacidade de limitar os níveis dos surtos de tensão que aparecem em determinados pontos do sistema elétrico e, consequentemente, reduzir a possibilidade de danos ocasionados por sobretensões.

A fim de garantir a correta especificação de tais equipamentos, é comum a realização de estudos pré-operacionais com a utilização de softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos. O software utilizado neste artigo, denominado PS SIMUL (Power Systems Simulator), é de origem brasileira e oferece diversos recursos que irão facilitar a obtenção dos resultados [1].

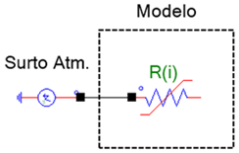
O trabalho irá abordar a modelagem de para-raios, além de realizar um estudo de caso visando avaliar a exatidão dos modelos em representar para-raios comerciais. Para isso, será realizado primeiramente todo o processo de parametrização, validação dos modelos e na sequência serão realizadas simulações com dados realistas, variando-se o ponto de incidência de descargas atmosféricas em uma linha adjacente a uma subestação de 138 kV, de forma a obter as sobretensões experimentadas no interior da subestação para cada um dos modelos testados.

* Rua Visconde de Ouro Preto, nº 75, CEP 38.405-202, Uberlândia, MG, Brasil – conprove@conprove.com.br

2 MODELAGEM DE PARA-RAIOS

2.1 Modelo Convencional

No software PS SIMUL, a relação entre tensão e corrente do para-raios é obtida com a utilização dos resistores não lineares, cuja característica não linear é modelada pela equação mostrada na Figura 1, onde os parâmetros Ki e αi podem ser cadastrados pelo usuário ou calculados automaticamente pelo software a partir da curva VxI. O modelo denominado Convencional pela literatura simula o comportamento do para-raios simplesmente com a inserção de um resistor não linear, como mostra a Figura 1, e por isso não contempla a característica dependente da frequência, como será comprovado nos estudos deste artigo.

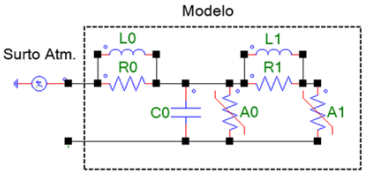


$$\frac{V}{V_{ref}} = K_i * \left(\frac{I}{I_{ref}}\right)^{1/\alpha_i}$$

Fig. 1. Modelo Convencional e equacão para característica não-linear.

2.2 Modelo IEEE

Essa proposta de modelagem representa a característica entre tensão e corrente através de duas seções de resistências não-lineares separadas por um filtro R-L, como pode ser visualizado na Figura 2. O circuito RL de entrada visa, além de eliminar instabilidades numéricas, representar a indutância associada ao campo magnético nas vizinhanças do varistor. O capacitor C0 representa a capacitância associada à altura do varistor ao solo [2]. A parametrização do modelo é realizada a partir das considerações também mostradas na Figura 2, onde **d** representa a altura do para-raios em metros e **n** o número de colunas paralelas do varistor.



$$L1 = 15 * \frac{d}{n}\ (\mu H) \quad R1 = 65 * \frac{d}{n}\ (\Omega)$$
$$L0 = 0,2 * \frac{d}{n}\ (\mu H) \quad R0 = 100 * \frac{d}{n}\ (\Omega)$$
$$C = 100 * \frac{n}{d}\ (pF)$$

Fig. 2. Modelo IEEE e considerações para sua parametrização.

Os autores do modelo estimam os resistores não lineares (A0 e A1) com utilização das curvas da Tabela I.

TABELA I. CARACTERÍSTICA DOS RESISTORES NÃO LINEARES.

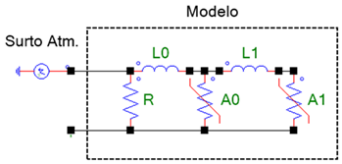
I (kA)	0,01	0,1	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
VA0 (pu)	1,4	1,54	1,68	1,74	1,8	1,82	1,87	1,9	1,93	1,97	2	2,05	2,1
VA1 (pu)	-	1,23	1,36	1,43	1,48	1,5	1,53	1,55	1,56	1,58	1,59	1,6	1,61

Após a realização das parametrizações iniciais utilizando a tabela e equações supracitadas, são necessários ajustes iterativos para os valores de tensão por unidade das curvas A0 e A1 e também para o valor de L1. O comportamento operacional do modelo possui duas situações. Para surtos com frentes de onda lentas, a impedância do filtro RL (R1 e L1) é muito baixa fazendo com que as seções não lineares A0 e A1 sejam consideradas em paralelo. Já em caso de frentes de onda rápidas, o filtro reduz a quantidade de corrente que flui pelo ramo de A1 e força a passagem da maior parcela pelo ramo A0 cujos valores de tensão são maiores, aumentando assim a tensão residual no para-raios. Com isso, através da simulação destes dois modos de operação é possível, através de iterações, a realização de ajustes nos valores de A0, A1 e L1 a fim de que sejam alcançados os níveis fornecidos nos catálogos de fabricantes.

2.3 Modelo Pinceti

Este modelo tem seu princípio de operação bastante similar ao modelo IEEE, contudo foram realizadas algumas alterações como a exclusão do capacitor devido seu pequeno efeito no comportamento do modelo, além da substituição das resistências em paralelo com as indutâncias por uma resistência alta entre os

terminais de entrada (utilizada para eliminar instabilidades numéricas), como mostra a Figura 3. A parametrização do modelo é realizada a partir das considerações também expostas nessa figura, onde $\boldsymbol{V_n}$ representa a tensão nominal do para-raios, $\boldsymbol{V_{R8/20}}$ a tensão residual para uma corrente de 10 kA e forma de onda de 8x20 µs, $\boldsymbol{V_{R1/T2}}$ a tensão residual frente a um surto de 10 kA de corrente e tempo de subida de 1 µs e $\boldsymbol{V_{R8/T2}}$ a tensão residual para uma corrente com frente de onda de 8 µs [3].



$$\boldsymbol{L1} = \frac{1}{4} * \frac{V_{R1/T2} - V_{R8/T2}}{V_{R8/20}} * \boldsymbol{V_n}$$

$$\boldsymbol{L0} = \frac{1}{12} * \frac{V_{R1/T2} - V_{R8/T2}}{V_{R8/20}} * \boldsymbol{V_n}$$

Fig. 3. Modelo Pinceti e considerações para sua parametrização.

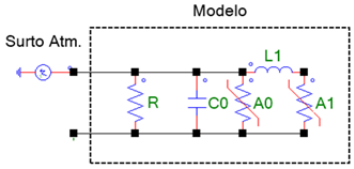
Os autores do modelo estimam as características não lineares (A0 e A1) mostradas na Tabela II.

TABELA II. CARACTERÍSTICA DOS RESISTORES NÃO LINEARES.

I (kA)	2E-6	0,1	1	3	10	20
VA0 (pu)	0,81	0,974	1,052	1,108	1,195	1,277
VA1 (pu)	0,623	0,788	0,866	0,922	1,009	1,091

2.4 Modelo Fernandez

Este modelo também tem seu princípio de operação bastante similar ao modelo IEEE, contudo foram realizadas alterações como a substituição das resistências em paralelo com as indutâncias por uma resistência alta entre os terminais de entrada (utilizada para eliminar instabilidades numéricas) e a eliminação de indutância de entrada, como mostra a Figura 4. As características não lineares deste modelo são ajustadas por dados fornecidos pelo fabricante, sendo respeitada uma condição adicional de que a razão entre as correntes I0 e I que fluem por A0 e pela entrada do circuito, respectivamente, permaneça constante por toda a escala de tensão. A razão 0,02 é adequada segundo os autores [4]. O cálculo da capacitância é realizado como no modelo IEEE e o valor da indutância L1 pode ser determinado por curvas pré-definidas pelos autores. Tais curvas representam a relação entre o tempo de frente de onda e o aumento percentual da tensão residual. Cada valor desse aumento residual ($\boldsymbol{\Delta U_{res}}$) é calculado pela equação também mostrada na Figura 4, onde $\boldsymbol{U_{In,T1}}$ representa a tensão residual para descarga com tempo de frente de onda T1 e amplitude nominal e $\boldsymbol{U_{In,8/20}}$ a tensão residual para descarga com amplitude nominal e forma de onda 8x20 µs.



$$\boldsymbol{\Delta U_{res}} = \frac{\boldsymbol{U_{In,T1}} - \boldsymbol{U_{In,8/20}}}{\boldsymbol{U_{In,8/20}}} * \mathbf{100}$$

Fig. 4. Modelo Fernandez e considerações para sua parametrização.

As curvas pré-definidas disponibilizadas pelos autores são associadas a um elemento de 1 kV com corrente nominal de descarga de 5 kA e 10 kA. As características não lineares para este bloco são disponibilizadas na Tabela III.

TABELA III. CARACTERÍSTICA DE TENSÃO-CORRENTE PARA UM ELEMENTO DE 1 KV.

Vresidual Máxima (kV)		**Descarga de corrente 8x20 µs (A)**		
Bloco de 5 kA	**Bloco de 10 kA**	**I**	**I0**	**I1**
2,87	2,73	1500	30	1470
3,07	2,90	3000	60	2940
3,27	3,07	5000	100	4900
3,60	3,33	10000	200	9800
4,27	3,77	20000	400	19600
5,30	4,53	40000	800	39200

3 PS SIMUL (POWER SYSTEM SIMULATOR)

A ferramenta utilizada, PS SIMUL, dispõe dos mais avançados recursos para a simulação de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistema de controle, possuindo uma interface amigável e intuitiva que facilita a montagem de projetos e análise de resultados. A solução permite que o usuário modele qualquer sistema de potência e/ou controle para simulação disponibilizando diversos modelos de dispositivos do sistema, inclusive vários destes ainda não contemplados por nenhum outro software de simulação transitória. Além de simular, o PS Simul permite também a reprodução/aquisição dos sinais em um hardware desenvolvido para este fim.

O PS Simul utiliza a integração trapezoidal para resolução das equações diferenciais e possui um grande benefício em relação aos outros simuladores digitais pelo fato de evitar oscilações numéricas em chaveamentos ao combinar o método de Euler com a integração trapezoidal.

No que tange às simulações para estudo de sobretensões e análise operativa de para-raios, o software engloba em sua biblioteca os principais modelos utilizados para estudos de coordenação de isolamento, sendo estes : Convencional, IEEE, Pinceti e Fernandez. Um recurso interessante disponibilizado em todos estes modelos é o chamado recurso de parametrização inteligente que possibilita ao usuário, em tempo de parametrização do componente, o submeta a descargas atmosféricas representadas pelo modelo de Heidler ou Rampa com variação de magnitude, tempo de frente e tempo de cauda, e verifique a tensão residual do para-raios de forma gráfica para os dados atuais parametrizados, como mostra a Figura 5. Além disso, são disponibilizados elementos como linhas de transmissão, cabos, fontes de descargas atmosféricas, entre outros.

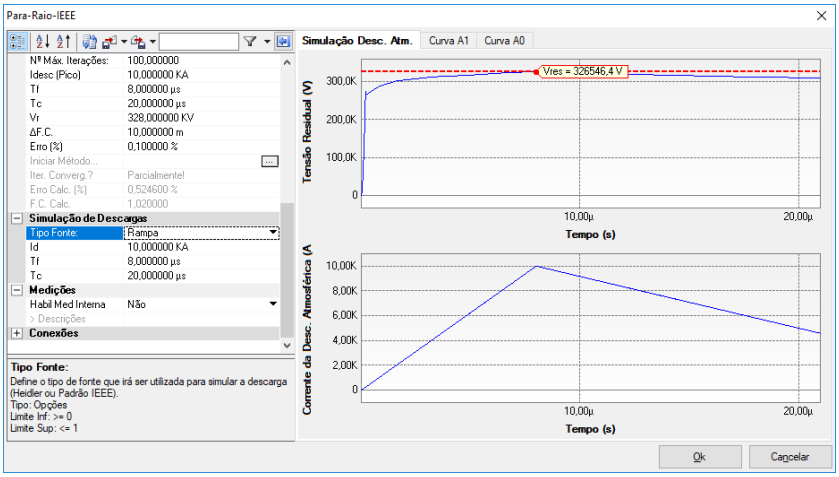


Fig. 5. Recurso de parametrização inteligente de para-raios do software PS SIMUL. Tela de parametrização do modelo IEEE de para-raios.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Parametrização dos Modelos de acordo com Dados do Fabricante

Na primeira etapa do estudo de caso deste artigo, será realizada a parametrização dos modelos de para-raios de forma a avaliá-los quanto à capacidade de representação do comportamento informado pelo fabricante ABB, sendo escolhido um para-raios tipo ZnO, sem gap, de código EXLIM-P com tensão nominal de 144 kV. Os modelos avaliados serão: IEEE, Pinceti, Fernandez e Convencional. A Tabela IV disponibiliza os dados necessários à parametrização dos modelos.

TABELA IV. DADOS PARA-RAIOS ZNO, SEM GAP, EXLIM-P (144 KV).

Tensão nominal (kV)	**Inominal descarga (kA)**	**Altura coluna (mm)**	**Δt de Frente e Cauda/I desc./ Vres. máxima**								
			Δt[µs]	30x60	8x20						1x5
			I[kA]	2	1,5	3	5	10	20	40	10
144	10	1756	**V[kV]**	274	289	302	312	328	361	394	340

Na parametrização do modelo IEEE através do componente disponibilizado pela biblioteca do software PS SIMUL, basta que sejam inseridos os dados de tensão base, número de colunas em paralelo e altura do para-raios. Dessa forma o software irá realizar de maneira automática a parametrização inicial de todos os componentes do modelo (R1, L1, R0, L0, A0, A1 e C0). Além disso, o componente automatiza os processos iterativos para que o usuário possa otimizar os valores de tensão base e indutância L1 da parametrização inicial. Dessa forma, a dificuldade que se encontra na definição final de ajustes para A0, A1 e L1 por processos iterativos é superada pelo automatismo oferecido por este software. Por fim, os valores encontrados para os componentes do modelo IEEE estão dispostos na Tabela V.

TABELA V. PARAMETRIZAÇÕES CONSIDERADAS PARA O MODELO IEEE.

I (kA)	0,01	0,1	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
VA0 (kV)	293	322	351	364	376	380	391	397	403	412	418	429	439
VA1 (kV)	-	257	284	299	309	314	320	324	326	330	332	334	337
Outros	R0 = 175,6 Ω ; L0 = 0,3512 uH ; R1 = 114,1 Ω ; L1 = 0,7168 uH ; C0 = 56,95 pF												

Na parametrização do modelo Pinceti através do componente disponibilizado pela biblioteca do software PS SIMUL, basta que sejam inseridos os dados de tensão base, tensão nominal, tensões residuais para surtos com frente de onda de 1 µs e 8 µs e valor da resistência conectada entre os terminais do para-raios. Dessa forma o software irá realizar de maneira automática a parametrização de todos os componentes do modelo (R, L0, L1, A0 e A1). Por fim os valores encontrados para os componentes internos do modelo Pinceti são mostrados na Tabela VI.

TABELA VI. PARAMETRIZAÇÕES CONSIDERADAS PARA O MODELO PINCETI.

I (kA)	2E-6	0,1	1	3	10	20
VA0 (kV)	265,68	319,47	345,06	363,42	391,96	418,85
VA1 (kV)	204,34	258,46	284,05	302,41	330,95	357,84
Outros	R = 1 MΩ ; L0 = 0,439 uH ; L1 = 1,317 uH					

Na parametrização do modelo Fernandez através do componente disponibilizado pela biblioteca do software PS SIMUL, basta que sejam inseridos os dados de: altura do para-raios, relação entre tensão residual para elemento de 1kV e para-raios a ser parametrizado (ambos submetidos a surtos com tempo de frente de onda de 8 µs), corrente nominal de descarga, tempo de frente de onda T1 considerado, tensões residuais para surtos com tempo de frente de onda de T1 e de 8 µs e valor da resistência conectada entre os terminais do para-raios. Dessa forma o software realiza de maneira automática o cálculo do aumento residual e encontrará o valor da indutância L1 através das curvas que já estão internamente cadastradas. Os demais componentes do modelo (C0, A0 e A1) também são calculados. Por fim os valores encontrados para os componentes internos do modelo Fernandez são mostrados na Tabela VII.

TABELA VII. PARAMETRIZAÇÕES CONSIDERADAS PARA O MODELO FERNANDEZ.

V (kV)	289	302	312	328	361	394
IA0 (A)	30	60	100	200	400	800
IA1 (A)	1470	2940	4900	9800	19600	39200
Outros	R = 1 MΩ ; L0 = 0,439 uH ; L1 = 1,317 uH					

Por fim, na parametrização do modelo Convencional através do componente de resistência não-linear da biblioteca do software, basta que se parametrize os pontos fornecidos pelo fabricante na curva V x I do componente.

4.2 Validação dos Modelos para representação de um para-raios comercial

Para validação das parametrizações realizadas os modelos foram submetidos diretamente à diferentes tipos de descargas atmosféricas, sendo estas: 3 kA (8x20 µs), 5 kA (8x20 µs), 10 kA (8x20 µs) e 10 kA (1x5 µs). Para representação das descargas atmosféricas foram utilizados dois tipos de fontes: Heidler e Rampa. Os

formatos das descargas aplicadas estão representadas na Figura 6, sendo considerada uma forma de onda 1 x 5 µs e pico de 10 kA.

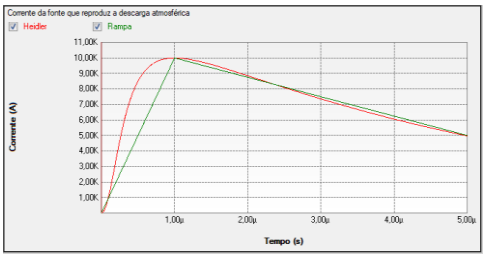


Fig. 6. Formas de onda para as fontes do tipo Heidler (em vermelho) e Rampa (em verde).

Com aplicação das diferentes descargas atmosféricas nos modelos parametrizados neste estudo, foram levantadas as tensões residuais observadas em cada caso e obtidos os erros percentuais com relação aos dados fornecidos pelo fabricante. Os resultados são mostrados na Tabela VIII.

TABELA VIII. RESULTADOS OBTIDOS COM OS CENÁRIOS SIMULADOS.

Tipo Fonte	**Modelo**	**3 kA – 8x20 µs**		**5 kA – 8x20 µs**		**10 kA – 8x20 µs**		**10 kA – 1x5 µs**	
		Vr (kV)	Erro (%)	Vr (kV)	Erro (%)	Vr (kV)	Erro (%)	Vr (kV)	Erro (%)
Heid.	**Conv.**	301,99	0,0003	311,99	0,0000	327,99	0,0000	327,99	3,5294
	IEEE	304,04	0,6760	311,60	0,1279	324,13	1,1804	359,03	5,5964
	Pinceti	299,11	0,9579	309,02	0,9564	328,05	0,0146	343,21	0,9457
	Fernan.	299,41	0,8564	310,47	0,4892	327,04	0,2929	347,30	2,1473
Rmp	**Conv.**	301,97	0,0068	311,98	0,0063	327,97	0,0077	327,97	3,5368
	IEEE	304,90	0,9614	312,93	0,3005	326,54	0,4431	345,73	1,6858
	Pinceti	299,73	0,7520	310,05	0,6227	329,78	0,5430	342,32	0,6825
	Fernan.	300,01	0,6572	311,47	0,1686	329,01	0,3097	343,34	0,9834

Para fins de visualização da resposta em função do tempo dos para-raios simulados, segue na Figura 7 as formas de onda de tensão residual (a) e corrente (b) no tempo para a descarga atmosférica de magnitude 10 kA – 1x5 µs, modelada como fonte de Heidler.

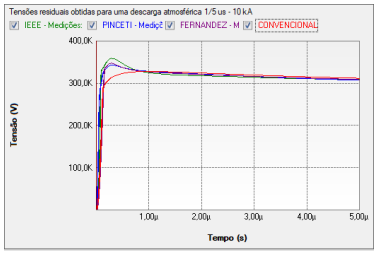


Fig. 7-(a). Tensão no tempo.

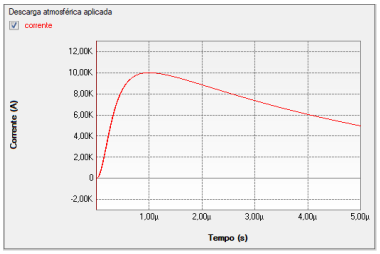


Fig. 7-(b). Corrente no tempo.

A Figura 8 mostra a dinâmica da resposta de tensão por corrente dos modelos IEEE (a), Pinceti (b), Fernandez (c) e Convencional (d) para esta mesma descarga atmosférica.

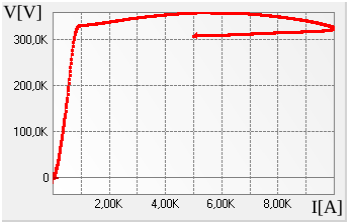


Fig. 8-(a). Modelo IEEE.

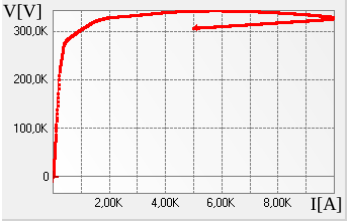


Fig. 8-(b). Modelo Pinceti.

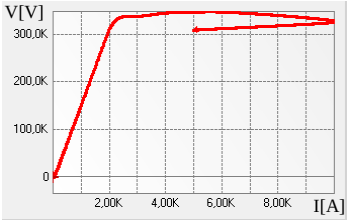


Fig. 8-(c). Modelo Fernandez.

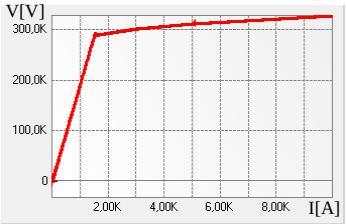


Fig. 8-(d). Modelo Convencional.

Nesta primeira etapa do estudo, a parametrização dos modelos com a utilização do software PS SIMUL foi facilitada consideravelmente, principalmente para o modelo IEEE, onde há necessidade de processos iterativos finais para ajustes das curvas de não-linearidades e da indutância L1 do filtro já que o componente da biblioteca deste software, dispõe de uma ferramenta que automatiza este processo de iterações para o usuário. Além disso, o fato das curvas de aumento de tensão residual percentual por tempo de frente de onda, utilizadas no modelo Fernandez, já estarem cadastradas internamente no componente, facilita bastante a parametrização da indutância L1 deste modelo.

Com relação aos erros percentuais obtidos na Tabela VIII, verifica-se que para as descargas com padrão 8x20 µs, os erros percentuais dos modelos IEEE, Pinceti e Fernandez são equivalentes e extremamente baixos. Observa-se também que para a descarga com padrão 1x5 µs o modelo IEEE apresenta erro percentual ligeiramente maior se comparado aos modelos Pinceti e Fernandez. Contudo, tais modelos apresentaram bons resultados com relação aos valores do fabricante, com erros que atingiram o percentual máximo de 1,68% para os cenários simulados com a fonte Rampa e 5,59% para os cenários simulados com a fonte Heidler.

A Tabela VIII comprova que o modelo Convencional não representa de maneira satisfatória o dinamismo do para-raios, visto que a máxima tensão residual obtida para uma descarga com tempo de frente de 1µs foi a mesma obtida para uma descarga com tempo de frente de 8µs. Além disso, apenas neste modelo não se observa o laço de histerese nos gráficos de tensão por corrente, fenômeno este que ocorre quando um varistor é submetido a um surto.

4.3 Simulação de descargas atmosféricas próximas a uma subestação de 138 kV

Utilizando os modelos apresentados, nesta parte do trabalho foi realizado um levantamento das máximas sobretensões experimentadas por uma subestação de 138 kV em função da ocorrência de descargas atmosféricas diretas na linha de transmissão adjacente à subestação.

Para modelar a linha de transmissão, foi considerada uma geometria típica de linhas da classe de 138 kV cujas dimensões são mostrada na Figura 9. A impedância de surto calculada para tal configuração geométrica foi de aproximadamente 365 Ω e a máxima corrente que poderá atingir os cabos fase, considerando a geometria apresentada é de 7,09 kA de pico para um ângulo de proteção de aproximadamente 30° [5].

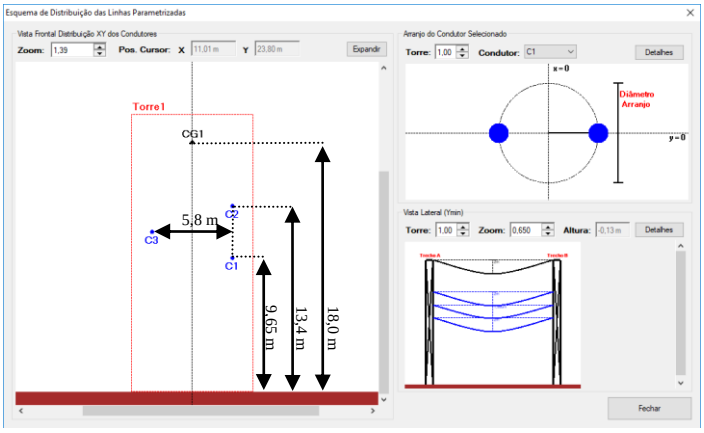


Fig. 9. Geometria típica considerada para a linha de 138 kV. Tela do software PS SIMUL.

Para a frequência do estudo, os equipamentos foram representados por suas capacitâncias próprias, com valores típicos para o nível de tensão de 138 kV. Para disjuntores e chaves seccionadoras considerou-se uma

capacitância de 0,1 nF, para os TC's considerou-se o valor de 0,21 nF, para os TP's capacitivos o valor de 4 nF e, por fim, para o transformador de potência foi considerado o valor de 3 nF [6].
A modelagem das descargas atmosféricas com fins a estudos de coordenação de isolamento de subestações, pode ser feita tanto por fontes de corrente que reproduzam fielmente a forma de onda típica de descargas ou simplificadamente como surtos de tensão com formato em rampa, sendo esta última utilizada neste trabalho.
A máxima tensão de crista para a descarga direta na linha de transmissão pode ser calculada multiplicando-se a impedância de surto da linha (365 Ω) pela corrente máxima que poderá atingir os cabos fase (7,09 kA) dividido por 2. Com isso a tensão de crista considerada nas simulações será de 1,294 MV [5].
Adotou-se como critério para a máxima sobretensão atmosférica admissível no interior das subestações o valor do BIL (nível básico de isolação) reduzido por uma margem de segurança de 15% [7]. No caso de transformadores de 138 KV o BIL é de 650 kV, e com a margem definido o valor adotado para o estudo foi de 553 kV.
O sistema modelado para simulação dos surtos segue representado na Figura 10, onde foram simulados inicialmente dois diferentes cenários. No primeiro deles a descarga atmosférica atinge a linha de transmissão a uma distância de 250 metros da entrada da subestação e no segundo a uma distância de apenas 25 metros da entrada da subestação. Os resultados de sobretensões máximas experimentadas nas barras B1, B2 e B3 seguem descritos na Tabela IX para os modelos IEEE, Pinceti e Fernandez.

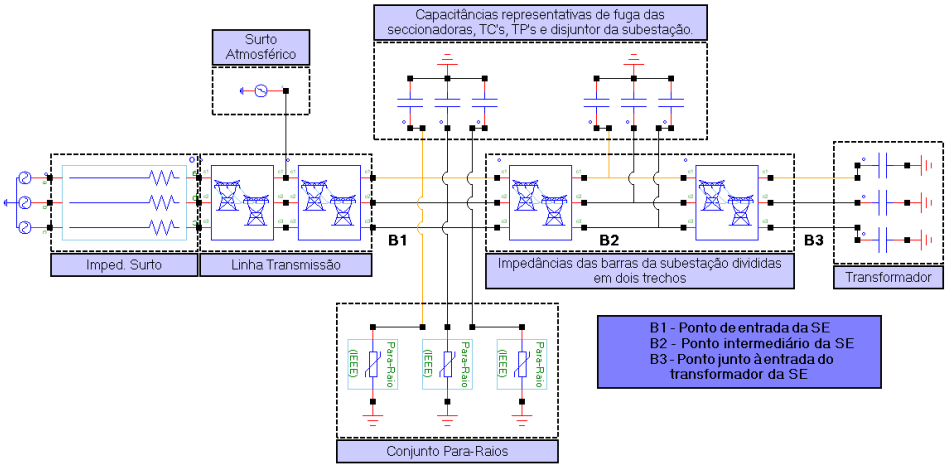


Fig. 10. Sistema para estudos de sobretensões atmosféricas em uma subestação de 138 kV.

TABELA IX. RESULTADOS OBTIDOS COM OS CENÁRIOS SIMULADOS.

Modelo	**Desc. a 250 m da entrada da subest.**			**Desc. a 25 m da entrada da subest.**		
	Vres(kV) B1	Vres(kV) B2	Vres(kV) B3	Vres(kV) B1	Vres(kV) B2	Vres(kV) B3
IEEE	340,626	443,071	479,478	421,934	593,331	641,865
Pinceti	340,808	435,311	471,228	457,814	582,419	626,899
Fernand.	348,631	425,706	459,268	458,945	625,661	673,651

De acordo com a Tabela IX, a diminuição da impedância percorrida do ponto da descarga até a entrada da subestação reflete no aumento das sobretensões experimentadas pelo transformador de potência e demais equipamentos presentes na subestação. Fazendo referência aos valores admissíveis para sobretensões, de 553 kV, pode-se concluir que para uma descarga que ocorre a 25 metros do ponto de entrada da subestação as sobretensões no transformador (Barra B3), experimentadas por todos os modelos, superaram o valor de referência adotado e sofreram uma variação de 4,06%, considerando o valor médio de 647,37 kV como referência.
Com isso, foi simulado um terceiro cenário com a mesma condição de ocorrência de descarga a 25 metros da entrada da subestação, porém com a instalação de um segundo para-raios na barra B2 com as mesmas características do instalado na barra B1. As sobretensões observadas para este terceiro cenário seguem apresentadas na Tabela X, onde verifica-se a redução considerável dos níveis alcançados em todos os barramentos interiores à subestação, adequando-os aos níveis admissíveis.

TABELA X. RESULTADOS OBTIDOS COM A INSTALAÇÃO DE OUTRO PARA-RAIOS NA BARRA B2.

Modelo	**Desc. a 25 m da entrada da subest.**		
	Vres(kV) B1	Vres (kV) B2	Vres (kV) B3
IEEE	393,1739	362,7792	475,1713
Pinceti	410,9962	380,7276	463,9723
Fernand.	426,6900	384,0366	487,2572

Na Figura 11 podem ser observadas as formas de onda das tensões nas barras interiores (B1, B2 e B3) nos dois cenários: sistema inicial (a) e sistema final (b) após a inserção do segundo conjunto de para-raios considerando o modelo Pinceti e a descarga a 25 metros da entrada da subestação.

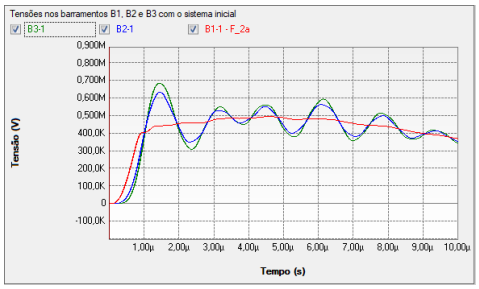


Fig. 11-(a). Tensões no sistema inicial.

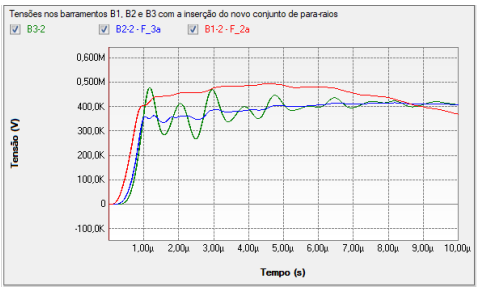


Fig. 11-(b). Tensões no sistema final.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas as principais características de diversos modelos disponíveis na literatura para reprodução do comportamento de para-raios, apresentando a combinação de elementos que formam cada um deles, o equacionamento e as parametrizações.

Outro aspecto a ser ressaltado se relaciona a ferramenta computacional utilizada nos estudos que, além de disponibilizar os principais modelos já implementados em sua biblioteca, possui uma metodologia de entrada de dados bastante facilitada e intuitiva. Dessa forma, a utilização do software PS SIMUL mostrou grandes vantagens, principalmente para ajuste dos modelos IEEE e Fernandez, ao incluir nestes componentes métodos que automatizam todos os processos de parametrização dos mesmos.

No processo de parametrização e validação dos modelos com os dados disponibilizados pelo fabricante, verificou-se que para as descargas com padrão 8x20 µs, os erros percentuais dos modelos IEEE, Pinceti, Fernandez e Convencional foram equivalentes e extremamente baixos. Observou-se também que para a descarga com padrão 1x5 µs o modelo IEEE apresentou erro percentual, que apesar de pequeno, foi ligeiramente maior se comparado aos modelos Pinceti e Fernandez. Nesta oportunidade, comprovou-se que apenas o modelo Convencional não representa de maneira satisfatória o dinamismo do para-raios, visto que a máxima tensão residual obtida para uma descarga com tempo de frente de 1µs foi a mesma obtida para uma descarga com tempo de frente de 8µs.

No estudo de utilização dos modelos em uma subestação de 138 kV, observou-se que, em um dos cenários, as sobretensões experimentadas pelo transformador de potência e demais equipamentos presentes na subestação superaram a margem de segurança considerada do nível de isolamento da subestação. Com isso, foi simulado um terceiro cenário com a mesma condição onde haviam sido ultrapassadas as tensões admissíveis, porém considerando a instalação de um segundo conjunto de para-raios na barra B2 (próxima à barra do transformador) onde verificou-se a redução considerável dos níveis alcançados em todos os barramentos interiores à subestação, demonstrando a importância dos estudos de descargas atmosféricas para adequação do sistema de proteção de surtos.

6 REFERÊNCIAS

[1] Conprove Engenharia, Indústria e Comércio, *PS SIMUL: Software para Modelagem do Sistema de Potência e Simulação de Transitórios Eletromagnéticos*. Acesso em 05 de julho de 2018, em: http://www.conprove.com.br/pub/i_ps_simul.html

[2] IEEE Working Group 3.4.11, “Modeling of metal oxide surge arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, p. 302-309, 1992.
[3] Pinceti, P., Giannettoni, M.“A simplified model for zinc oxide surge arresters” , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, Nº 2, p.393-398, 1999.
[4] Fernandez F., Diaz R., “Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations” paper 144, International Conference on Power Systems Transients, IPST, 2001.
[5] D’Ajuz, A. e outros, “Equipamentos elétricos – especificação em subestações de alta tensão”, Furnas, Rio de Janeiro, 1985.
[6] IEEE Std C37.011,1994 – “IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis”.
[7] IEEE Std 1313.1,1996 – “IEEE Standard for Insulation Coordination, Definitions, Principles and Rules”.