

# UMA COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO CONVENCIONAL E O MODELO VARIÁVEL COM A FREQUÊNCIA PARA MODELAGEM DE PARA-RAIOS

L. S. Marroques<sup>1</sup>, M. L. R. Chaves<sup>1</sup>, G. C. Guimarães<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – Minas Gerais  
[marroques.lucas@gmail.com](mailto:marroques.lucas@gmail.com), [lynce@ufu.br](mailto:lynce@ufu.br), [gcaixeta@ufu.br](mailto:gcaixeta@ufu.br)

**Resumo** - Este artigo trata da comparação entre o modelo de para-raios convencional e o modelo variável com a frequência, utilizados em simulações de coordenação de isolamento. Que verificam os corretos dimensionamento e alocação dos para-raios no sistema em questão. O trabalho é desenvolvido no programa ATP/ATPDraw, pois se trata de um problema de transitórios eletromagnéticos. Após um embasamento teórico, simulações comparativas dos modelos serão feitas para se apreciar as diferenças dos resultados, e encontrar os valores de erro para os diferentes tipos de surto.

**Palavras-Chave** - ATP/ATPDraw, sobretensões, para-raios, simulação digital, suportabilidade dielétrica.

## A COMPARISON BETWEEN THE CONVENTIONAL AND THE MODEL WITH VARIABLE FREQUENCY TO MODELING SURGE ARRESTERS.

**Abstract** - This paper deals with the analysis between the conventional model and the model variable with the frequency, used in simulations of insulation coordination. That verifies the correct sizing and allocation of surge arresters at the system in question. The work is developed in the ATP / ATPDraw program because it is a transient electromagnetic problem. After a theoretical background, comparative simulations of the models will be made to appreciate the differences of the results, and find the error values for different types of surge.

**Keywords** - ATP/ATPDraw, overvoltages, surge arresters, digital simulation, dielectric withstand.

### I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico está sujeito a grandes sobretensões de manobra ou atmosféricas, para a sua proteção são usados para-raios, essenciais para limitar o nível de tensão, protegendo assim os equipamentos da subestação. Durante o surto o excesso de corrente do sistema é conduzido para a terra [1].

Na utilização dos para-raios para a proteção contra sobretensões deve ser observado o maior valor de sobretensão que pode surgir no sistema no período de dez segundos, que será a tensão nominal do para-raios. E também deve ser observada a capacidade de absorção de energia do mesmo [2].

Existe uma relação entre a vida útil do para-raios e sua capacidade de absorção de energia. Já o valor de sobretensão é o próprio nível de proteção oferecido para os equipamentos da rede.

Muitos aspectos importantes surgem na utilização de para-raios para proteção contra sobretensões. E para analisar-se um correto nível de proteção por meio de simulações, a primeira preocupação é a modelagem desse dispositivo. Existem dentro do ATP três modelos de ramos não lineares para esse fim. Existem também outros modelos mais sofisticados, com um funcionamento baseado em teorias com detalhes rebuscados [3].

A teoria mais bem aceita por pesquisadores dessa área do estudo tem em seu embasamento o fato de que o para-raios possui um comportamento dinâmico, dependente da frequência do surto que atinge a instalação [4].

Tal fenômeno tem explicação. Quando ocorre um surto de corrente na rede elétrica, o tempo de subida desse surto é inversamente proporcional à tensão que aparece nos terminais do para-raios. Quanto mais rápido o surto, maior a tensão [5].

Tal teoria fundamentou um modelo elétrico de para-raios, o modelo IEEE. Desse modelo surgiram outros modelos dos quais se destacam dois, o modelo Pinceti e o modelo Fernández. As diferenças entre os três modelos está no arranjo do modelo, e no cálculo e ajuste dos parâmetros.

Para surtos de frentes de onda rápidas com tempo de crista inferior a 8 ( $\mu s$ ), 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 a 6% quando o tempo da frente de onda é reduzido de 8 ( $\mu s$ ) para 1,3 ( $\mu s$ ) [6].

A tensão nos terminais do para-raios não é somente uma função do valor da corrente de descarga, mas também da taxa de sua subida. Este fato torna-se relevante principalmente quando de estudos de coordenação de isolamento.

Sendo a finalidade de um estudo a correta alocação e o correto dimensionamento dos para-raios de um sistema, a modelagem do para-raios poderá ser a do modelo convencional. Uma resistência de comportamento não linear, tal comportamento deve ser descrito pela curva característica do para-raios fornecida pelo fabricante. Fica menos dispendioso para o computador a verificação do nível de sobretensão e da energia a ser dissipada quando da ocorrência do surto [7].



XII CEEEL – ISSN 2178-8308  
13 a 17 de Outubro de 2014  
Universidade Federal de Uberlândia – UFU  
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

Para tal uso é necessário que se utilize uma margem de segurança para a sobretensão encontrada. Com essa orientação, o resultado é aceitável para esses aspectos de engenharia e o esforço computacional é muito menor, tornando a simulação mais simples e fácil de ser aplicada em diversos estudos do mesmo cunho [8].

Mesmo que os outros três modelos, IEEE, Pinceti e Fernández, apresentem diferenças nos valores das sobretensões no sistema quando submetidos a uma descarga atmosférica, tais diferenças são pequenas para tornar necessária a utilização desses modelos, visto que a simulação tornar-se-á muito mais onerosa ao computador. À medida que aumenta a quantidade de para-raios no sistema, mais tempo e mais esforço são necessários para completar o estudo [9].

Em outros trabalhos, com diferentes objetivos, uma dessas três modelagens deve ser utilizada, pois os valores de erro devem ser muito pequenos e o esforço computacional não é tão importante como para esse trabalho.

O objetivo do trabalho é comparar os resultados de duas metodologias para modelagem de para-raios. Uma que é utilizar o modelo convencional e a outra que se trata da utilização de um modelo variável com a frequência.

No decorrer desse trabalho será feita uma comparação conceitual das duas metodologias, e uma também uma proposta de simulação para consolidar o estudo.

Após isso serão apresentados a simulação e os resultados, que formarão uma base para as conclusões finais.

## II. A COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO SIMPLES E O MODELO VARIÁVEL COM A FREQUÊNCIA

Sabe-se que o evento que traz o maior nível de sobretensão em uma rede elétrica é a descarga atmosférica direta. Esse fato faz com que em um estudo de coordenação de isolamento, considerar a descarga atmosférica direta para verificar os corretos dimensionamento e alocação dos para-raios é uma boa prática [10].

Em diversas normas são mostrados os parâmetros de definição para impulsos de corrente. Há impulsos de corrente e de tensão. Existem dois tipos de impulsos de corrente, o impulso de corrente exponencial e o impulso de corrente retangular. Dentro do impulso de corrente exponencial, existe um tipo especial, o impulso de corrente atmosférico.

Sabe-se que os surtos atmosféricos possuem tempos pequenos de frente de onda, e tempos de cauda relativamente curtos. Essa característica é reproduzida nas formas padrões. Mas a maior importância do processo de normatização é que surtos com tais formas de onda podem ser produzidos com facilidade na maioria dos laboratórios [11].

A normatização define parâmetros para impulsos de corrente exponenciais; em relação a tempo, valores de pico, polaridade reversa, energia e tolerâncias dos limites. Pode-se observar os diferentes valores de forma de onda para os surtos exponenciais. Tais valores são muito interessantes em estudos que abrangem o comportamento de um para-raios quando submetido a tais surtos [12],[13].

As normas IEC 60099-4 e IEC 60060-1 se diferem nos limites de cada variável. Observado nas tabelas I e II.

Tabela I – Impulsos exponenciais padrões segundo a norma IEC 60060-1

Forma de Onda	Tempo de Frente	Tempo de Cauda	Valor de Pico	Polaridade Reversa
1/20	$1\mu s \pm 10\%$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%
4/10	$4\mu s \pm 10\%$	$10\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%
8/20	$8\mu s \pm 10\%$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%
30/80	$30\mu s \pm 10\%$	$80\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	20%

Tabela II – Impulsos exponenciais padrões segundo a norma IEC 60099-4

Forma de Onda	Tempo de Frente	Tempo de Cauda	Valor de Pico	Polaridade Reversa
1/20; 20kA	$0,9\mu s \leq T_f \leq 1,1\mu s$	$20\mu s$	$\pm 5\%$	-
4/10; 100kA	$3,5\mu s < T_f < 4,5\mu s$	$9\mu s < T < 11\mu s$	$\pm 10\%$	20%
8/20; 20kA	$7\mu s \leq T_f \leq 9\mu s$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	-
30/80; 40kA	$25\mu s < T_f < 35\mu s$	$70\mu s \leq T \leq 90\mu s$	$\pm 10\%$	20%

As formas de onda dos surtos são as mesmas para ambas as normas. Já as tolerâncias das duas normas são diferentes. Para os tempos de frente e de cauda, na norma IEC 60060-1 há um valor fixo de 10% para mais ou para menos, na norma IEC 60099-4 o valor não é o mesmo para todas as formas, existem valores que garantem um percentual diferente. E o valor de pico para a forma de onda 1/20( $\mu s$ ), é de 10% para mais ou para menos na norma IEC 60060-1, e de 5% para mais ou para menos na norma IEC 60099-4.

As diferenças não são grandes e não representam contrariedades, apenas divergências que não implicam em grandes preocupações para simulações.

Para que se faça uma comparação entre o uso de um ramo não-linear e um modelo mais sofisticado, que apresente a característica de variação de acordo com a frequência, pode-se fazer uso da base do modelo Fernández, que apresenta a solução com o menor erro. Os dois modelos representam o mesmo para-raios, e uma gama das descargas atmosféricas, com vários tipos de forma de onda do surto, serão submetidas aos modelos.

O para-raios a ser simulado será de 132 (kV). Com uma característica não-linear, pela tabela III.

Tabela III – Valores da curva VxI do para-raios

Tensão (V)	Corrente (A)
114000	0,001
132000	0,002
242600	100
267500	1000
311000	10000
342100	20000
376300	40000
391900	50000

A linha de transmissão será modelada de acordo com o modelo distribuído e linhas transpostas, com um comprimento de 10(km), e com os seguintes parâmetros:

$R' = 0,05 \Omega/\text{km}$   
 $L' = 1,0 \text{ mH}/\text{km}$   
 $C' = 11,11 \text{ nF}/\text{km}$

A simulação terá um tempo de integração de 1,75 (ns), e um tempo máximo de 200  $\mu\text{s}$ . A partir desses valores pode-se chegar a uma impedância característica de 300 $\Omega$ .

É a fonte de surto será aquela que foi anteriormente mostrada. O valor de pico de cada descarga será de 20 (kA). Serão cinco tipos de surtos atmosféricos, que se diferem apenas nos tempos de subida e descida. As formas de onda serão as 1,2/50, 1/20, 4/10, 8/20 e 30/80. Essas formas apresentam uma ordem completa para ensaio de um para-raios para todos os tipos de frente de onda.

A representação com um ramo resistivo para o equipamento é mostrada na figura 1.

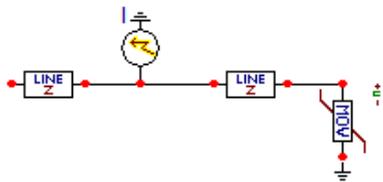


Fig. 1. Representação do modelo convencional no ATP.

Os ensaios serão feitos com o ramo não-linear do tipo MOV, que é aquele que representa os para-raios de óxido de zinco. Esse tipo de ramo será usado para todos os surtos do ensaio.

A modelagem que abrange o comportamento variável com a frequência é mostrada na figura 2.

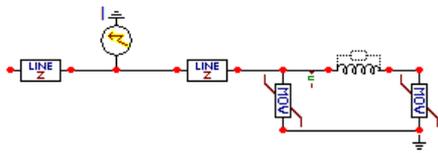


Fig. 2. Representação do modelo variável com a frequência no ATP.

O valor de indutância é dado em função da tensão nominal do para-raios. Tal indutância vale 0,08( $\mu\text{H}/\text{kV}$ ). Como a tensão é de 132(kV), o valor de indutância para as simulações será de 10,560 ( $\mu\text{H}$ ).

O primeiro ramo MOV apresenta um valor de corrente de 0,02 vezes a corrente da característica do para-raios dado pelo fabricante, para a mesma tensão aplicada. Já o segundo ramo apresenta um valor de 0,98 vezes. Dessa forma tais valores são dados pela tabela IV.

Tabela IV – Valores da curva VxI do para-raios

Tensão(V)	Corrente (A) Primeiro Ramo	Corrente (A) Segundo Ramo
114000	0,00002	0,00098
132000	0,00004	0,00196
242600	2	98
267500	20	980
311000	200	9800
342100	400	19600
376300	800	39200
391900	1000	49000

### III. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As curvas de ambas as modelagens serão sobrepostas para garantir uma melhor observação da diferença de comportamento quando o sistema é submetido a descargas atmosféricas de frente de onda rápida e lenta.

As curvas em vermelho são do modelo variável com a frequência, já a curva em verde pertence ao modelo convencional.

A primeira simulação será para um surto da forma 1,2/50( $\mu\text{s}$ ). Será feita uma ampliação dos maiores valores de tensão, positiva e negativa. Serão calculados os erros obtidos para a utilização do modelo convencional quando comparado ao modelo variável com a frequência para se verificar posteriormente qual a margem de segurança correta. A figura 3 mostra as sobreposições para os dois modelos.

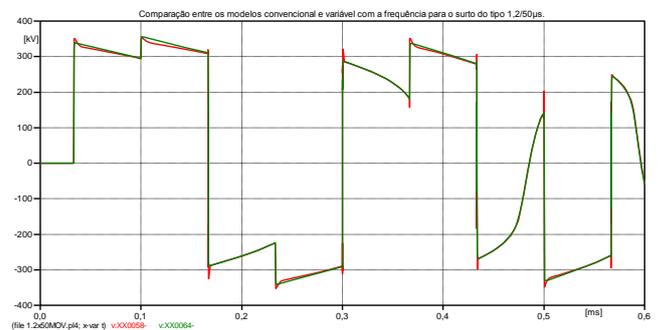


Fig. 3. Comparação entre os modelos convencional e variável com a frequência para o surto do tipo 1,2/50 $\mu\text{s}$ .

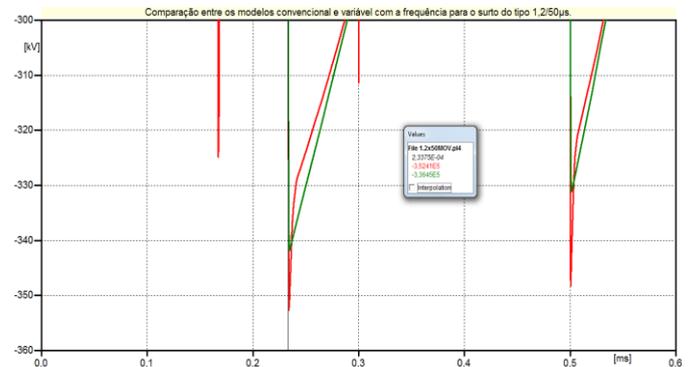


Fig. 4. Pico de tensão negativa do modelo variável com a frequência para o surto do tipo 1,2/50 $\mu\text{s}$ .

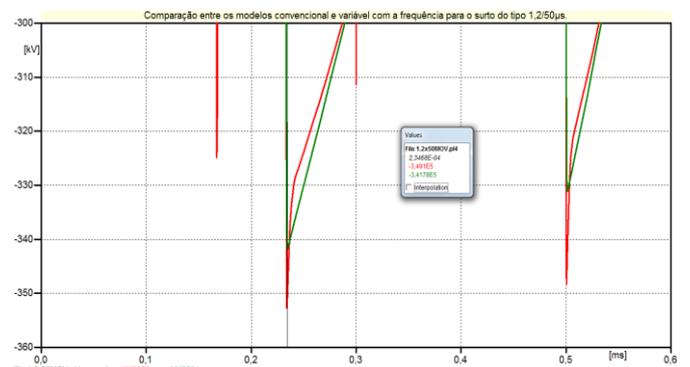


Fig. 5. Pico de tensão negativa do modelo convencional para o surto do tipo 1,2/50 $\mu\text{s}$ .

Aqui a diferença é 10,630 (kV), com 3,016% de erro.

Agora será feita a simulação para um surto da forma 1/20(μs). Como também é uma onda de frente rápida, os valores de erro serão próximos dos já encontrados.

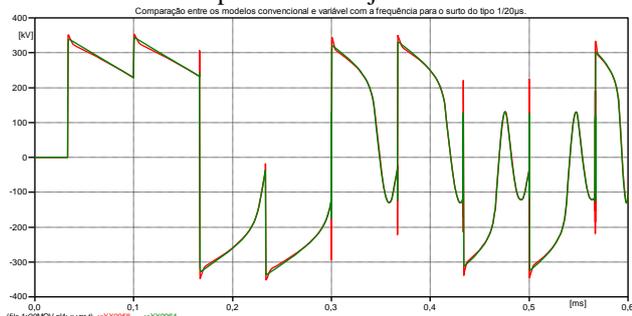


Fig. 6. Comparação entre os modelos convencional e variável com a frequência para o surto do tipo 1/20μs.

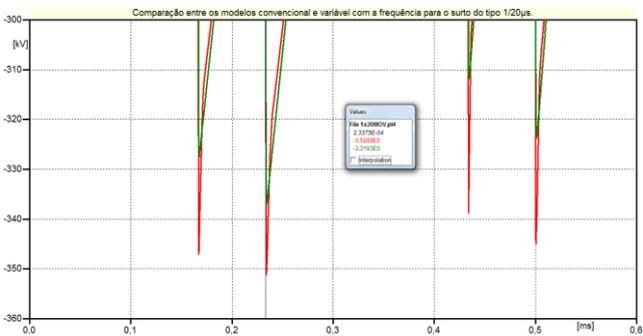


Fig. 7. Pico de tensão negativa do modelo variável com a frequência para o surto do tipo 1/20μs.

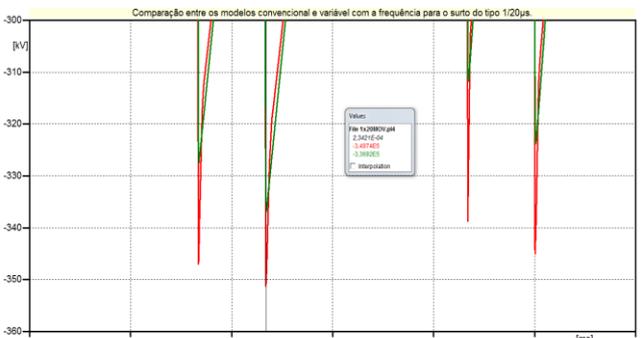


Fig. 8. Pico de tensão negativa do modelo convencional para o surto do tipo 1/20μs.

A discrepância é de 14,070 (kV), e o erro de 4,009%. Agora será feita a simulação para um surto da forma 4/10(μs).

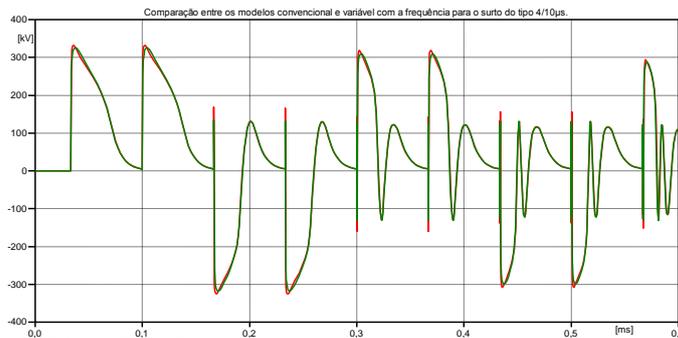


Fig. 9. Comparação entre os modelos convencional e variável com a frequência para o surto do tipo 4/10μs.

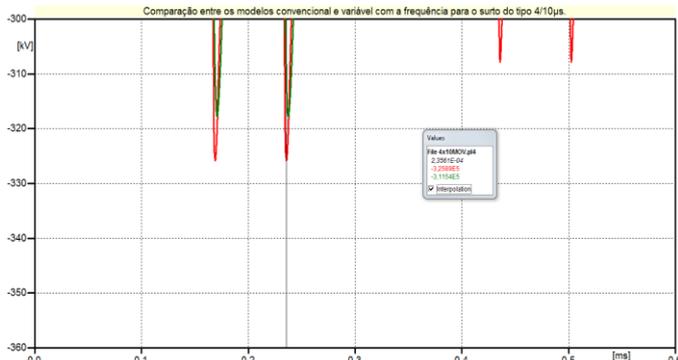


Fig. 10. Pico de tensão negativa do modelo variável com a frequência para o surto do tipo 4/10μs.

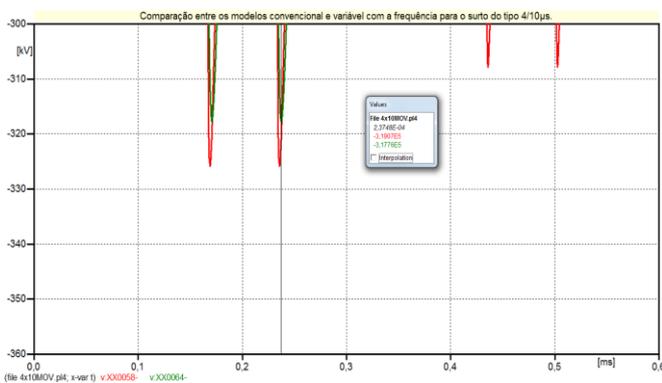


Fig. 11. Pico de tensão negativa do modelo convencional para o surto do tipo 4/10μs.

O erro resultou em 2,495% e a diferença nas tensões de 8,130(kV).

Os resultados para a simulação com a forma de onda padrão 8/20(μs) são mostrados a seguir. Espera-se uma diferença pequena para esse caso, já que não se trata de uma onda de frente rápida.

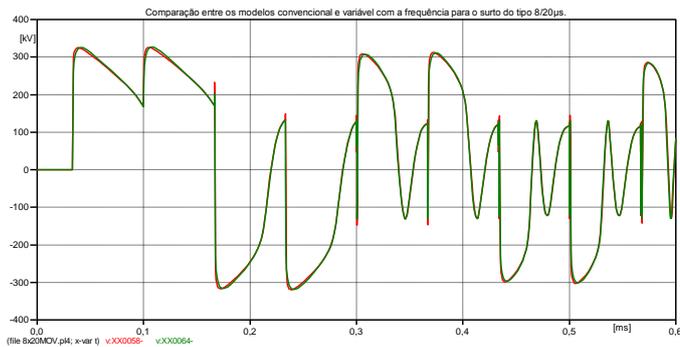


Fig. 12. Comparação entre os modelos convencional e variável com a frequência para o surto do tipo 8/20µs.

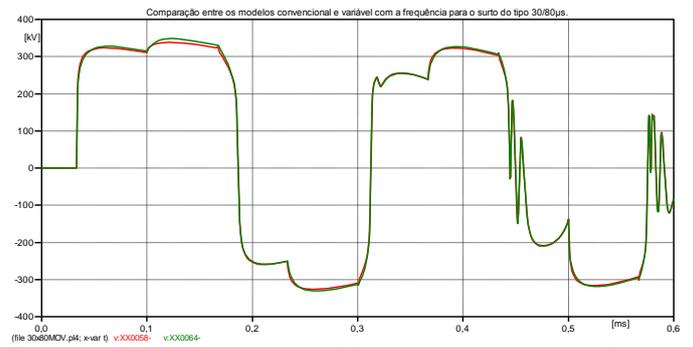


Fig. 15. Comparação entre os modelos convencional e variável com a frequência para o surto do tipo 30/80µs.

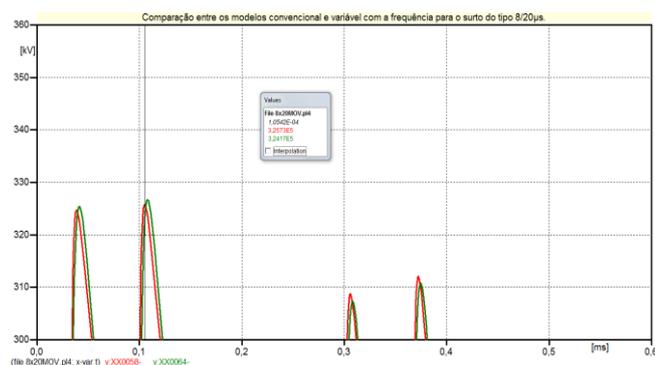


Fig. 13. Pico de tensão positiva do modelo variável com a frequência para o surto do tipo 8/20µs.

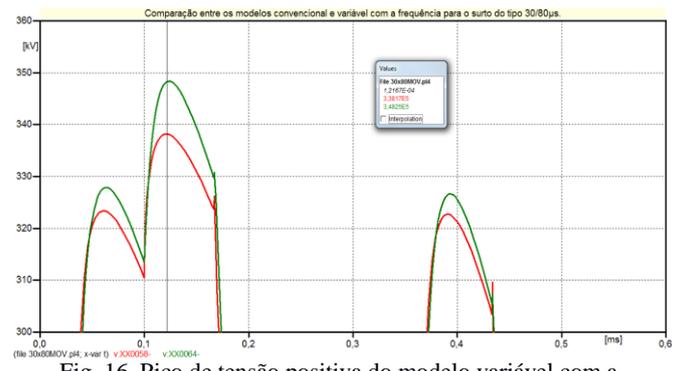


Fig. 16. Pico de tensão positiva do modelo variável com a frequência para o surto do tipo 30/80µs.

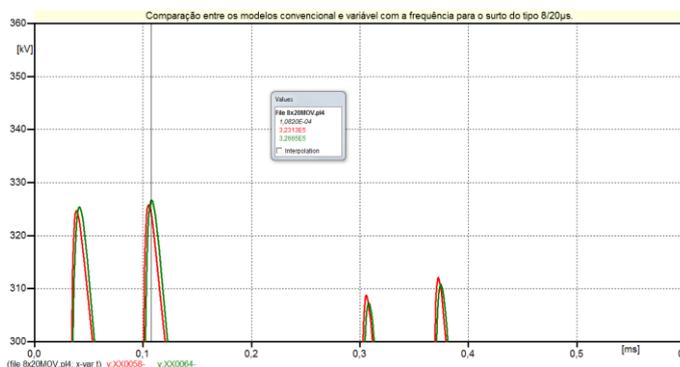


Fig. 14. Pico de tensão positiva do modelo convencional para o surto do tipo 8/20µs.

Com uma diferença de apenas 0,920 (kV), o erro é de apenas 0,282%.

E para um surto de manobra, da forma 30/80µs, os valores de sobretensão esperados são pequenos. Como pode ver nas figuras 15, 16 e 17.

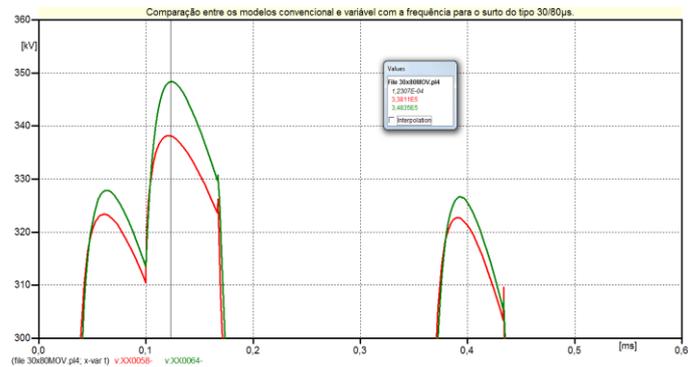


Fig. 17. Pico de tensão positiva do modelo convencional para o surto do tipo 30/80µs.

Com um erro de 2,922%, a diferença apresentada é de 10,180 (kV).

#### IV. CONCLUSÕES

A maior diferença encontrada foi para a simulação com surto da forma 1/20(µs). E foi de A de 14,070 (kV), totalizando um erro de 4,009%. Em função da proximidade das formas de onda encontradas para as tensões, e dos baixos valores de erro.

Pode-se concluir que a utilização do modelo convencional é correta, sendo necessária apenas a utilização de uma margem de segurança para superar essa diferença dos resultados.

O modelo convencional tem a vantagem de ser computacionalmente menos oneroso, inclusive quanto à determinação da energia a ser dissipada quando da ocorrência do surto.

Existe a necessidade de se explicar em trabalhos futuros a utilização de outros tipos de ramos não lineares disponíveis no ATP. Onde poderiam ser mais explorados o tempo e a onerosidade da simulação para o computador, a melhora de possibilidade de convergência e a interferência que a mudança do tipo de ramo traz para os resultados finais.

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu apoio financeiro do Ministério da Educação por meio da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, e também apoio institucional da Universidade Federal de Uberlândia.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lira, G. R. S. *Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com base na Medição da Corrente de Fuga Total*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, julho 2012.
- [2] Meister, A. *Modelagem de varistores de óxido de zinco para estudos de coordenação de isolamento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, dezembro 2005.
- [3] 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.
- [4] Bayadi, A; Harid, N; Zehar, K; Belkirat, S – *Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients* - International conference on Power System Transients – IPST 2003 – 28 September – October 2 2003.
- [5] 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.
- [6] Fernández, F; Diaz, R – *Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations* – International conference on Power System Transients – IPST'01 – 20 – 24 June 2001.
- [7] ATP Rule Book - *Can/Am EMTP User Group*, USA, 1997.
- [8] Wanderley, S; Miguel, P – *Comparação dos modelos de para-raios utilizados para simulação no ATP* – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011.
- [9] Neiva, S – *Avaliação do efeito da distância de separação entre para-raios e equipamentos protegidos* – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011.
- [10] Wanderley, S; Miguel, P – *Comparação dos modelos de para-raios utilizados para simulação no ATP* – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011.
- [11] Neiva, S – *Avaliação do efeito da distância de separação entre para-raios e equipamentos protegidos* – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011.
- [12] IEC 60060-1– *High-voltage test techniques* – Part 1: General definitions and test requirements – Second edition – 1989-11 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 1989.
- [13] IEC 60099-4 – *Surge Arresters* – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems – edition 2.2 – 2009-05 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 2009.

### DADOS BIOGRÁFICOS

**Lucas Silveira Marroques**, nascido em 21/09/1990 em Uberlândia-MG, é engenheiro eletricista (2012) pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é analista de infraestrutura desempenhando suas atividades no Ministério de Minas e Energia. Possui experiência em estudos da expansão do sistema de transmissão e em estudos para a obtenção de pareceres de acesso da geração eólica à rede básica. Suas áreas de interesse são: Dinâmica de Sistemas Elétricos, Fluxo de carga, Estabilidades Transitória e de Tensão, Qualidade da Energia Elétrica, Transitórios Eletromagnéticos, e Energia Eólica.

**Marcelo Lynce Ribeiro Chaves**, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia(1975), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal de Uberlândia(1978), mestrado em Mestrado Em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia(1987) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas(1995). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Uberlândia. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atuando principalmente nos seguintes temas: Eletrificação Rural, Divisores de Tensão Capacitivos, Cabos Pára-raios Energizados.

**Geraldo Caixeta Guimarães**, concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1977), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1984) e doutorado (PhD) em Electrical Engineering pela University of Aberdeen (1990). Foi admitido na Universidade Federal de Uberlândia em janeiro de 1978, tornando-se professor titular em 1992. Em janeiro de 1994 tornou-se o tutor do Programa de Educação Tutorial (PET) do curso de Engenharia Elétrica da UFU. Com relação a suas experiências de ensino, pesquisa e desenvolvimento, este tem atuado nas áreas de Geração, Transmissão, Distribuição e Utilização da Energia Elétrica, principalmente com os seguintes temas: energia eólica, geração distribuída, dinâmica e controle de sistemas elétricos, fluxo de carga, estabilidades transitória e de tensão. Mais recentemente tem realizado ensino e pesquisa em Eletromagnetismo Aplicado.