

Métodos de Otimização Aplicados à Estimação de Parâmetros de Modelos Dinâmicos de Para-raios de ZnO

Thainá Santos Xavier
George Rossany Soares de Lira
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande

Resumo— Este trabalho apresenta uma técnica de estimação de parâmetros de modelos dinâmicos de para-raios de ZnO (óxido de zinco), com a aplicação de alguns métodos de otimização. A técnica apresentada baseia-se no ajuste da forma de onda da tensão residual fornecida pelo modelo à medida em laboratório para diferentes impulsos de corrente. Os modelos de para-raios estudados foram representados no *software* ATP (*Alternative Transients Program*) e simulados mediante os impulsos de corrente, tendo seus parâmetros ajustados por meio da técnica de estimação de parâmetros aqui apresentada. Os impulsos foram obtidos experimentalmente em ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os resultados mostram que a técnica se adequa a diferentes modelos de para-raios e leva a respostas mais precisas que as obtidas pelas técnicas estabelecidas pelos próprios modelos.

Palavras-chave— estimação de parâmetros, ajuste de curvas, métodos de otimização, modelos de para-raios, transitórios eletromagnéticos.

I. INTRODUÇÃO

Os para-raios de óxido de zinco (ZnO) são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões, como as causadas por descargas atmosféricas e operações de chaveamento. Desta forma, os para-raios evitam danos em outros equipamentos, tais como transformadores, e, consequentemente, a descontinuidade no serviço de distribuição de energia elétrica.

A principal característica dos para-raios de óxido metálico é a relação $V \times I$ ser altamente não-linear. Isso significa que para níveis de tensão normais, o para-raios possui uma alta impedância, circulando uma corrente da ordem de microampéres por seus terminais – a corrente de fuga; e na ocorrência de sobretensões, o para-raios apresenta uma impedância muito baixa, conduzindo uma corrente elevada.

Além da característica altamente não-linear, os para-raios de ZnO apresentam uma característica dinâmica. Esta característica refere-se ao fato de que a tensão sobre o para-raios aumenta com a diminuição do tempo de frente da corrente que o percorre e que o pico da tensão ocorre antes do pico da

corrente. Os modelos de para-raios de ZnO chamados dinâmicos tentam representar esta característica.

Diversos modelos podem ser encontrados na literatura, e cada um possui um procedimento particular para a estimação de seus parâmetros. A maioria baseia-se em experimentação, ou seja, nenhuma formalização matemática é realizada. Visto que ainda existem muitas limitações nos procedimentos para modelagem de para-raios de ZnO, neste trabalho é apresentada uma técnica de estimação de parâmetros de modelos de para-raios, que pode ser aplicada aos diversos modelos existentes, como também utilizada com diferentes métodos de otimização, como será mostrado nas seções seguintes.

A preocupação em se obter modelos ótimos de para-raios de ZnO deve-se ao fato de que os modelos dos diversos equipamentos elétricos existentes em um sistema elétrico são utilizados em simulações pelas concessionárias de energia elétrica para estudos de coordenação de isolamento, seleção de equipamentos, localização de para-raios, entre outros.

II. MODELOS DINÂMICOS DE PARA-RAIOS DE ZNO

Neste trabalho foram estudados quatro modelos: modelo convencional, modelo do IEEE W. G. 3.4.11, modelo de Pinceti et al. e modelo de Popov et al., cujas características estão descritas a seguir.

A. Modelo convencional

No modelo convencional, a característica $V \times I$ do para-raios é representada por um resistor não-linear composto por vários segmentos, no qual cada segmento pode ser aproximado por retas ou pela seguinte equação [1]:

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad (1)$$

onde os parâmetros i e v são a corrente e a tensão no para-raios, respectivamente, q é o expoente, p o multiplicador para cada segmento e V_{ref} é uma tensão de referência arbitrária que normaliza a equação e previne problemas de representação numérica (*overflow*) durante a potenciação. Para tensões substancialmente menores que V_{ref} , a corrente será extremamente pequena e erros de estouro numéricos (*underflow*) poderão ocorrer. Para evitar este tipo de problema

e aumentar a velocidade da simulação, o primeiro segmento da curva é aproximado por uma reta [2]. Os demais segmentos são formados a partir dos pontos da curva característica do para-raios.

B. Modelo do IEEE

No modelo proposto pelo IEEE W. G. 3.4.11, a característica não-linear $V \times I$ do para-raios é obtida por duas resistências não-lineares A_0 e A_1 , vistas na Fig. 1.

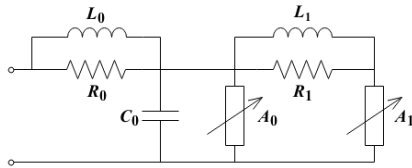


Figura 1. Modelo proposto pelo IEEE.

O filtro R - L entre A_0 e A_1 composto pela resistência R_1 e a indutância L_1 é responsável por gerar o efeito dinâmico do modelo. Para frentes de onda lentas, o filtro R - L apresenta uma impedância muito baixa e as resistências não-lineares do modelo ficam praticamente em paralelo. Para frentes de onda rápidas, o filtro R - L apresenta uma alta impedância. Como consequência disto, a corrente é forçada a percorrer mais a resistência não-linear A_0 do que a resistência não-linear A_1 . Como A_0 tem uma tensão característica maior do que A_1 [3], o resultado é uma tensão maior para transitórios rápidos, o que gera o efeito dinâmico. A indutância L_0 representa a indutância associada a campos magnéticos nas imediações do para-raios, a capacitância C_0 simula o efeito capacitivo e a resistência R_0 é usada para evitar instabilidade numérica durante a simulação do modelo.

C. Modelo de Pinceti et al.

Pinceti et al. propuseram uma simplificação do modelo do IEEE, com pequenas modificações. Observando o modelo na Fig. 2, verifica-se que as resistências R_1 e R_0 foram substituídas pela resistência R , a qual tem a finalidade de evitar problemas numéricos, e a capacitância C_0 foi eliminada porque, segundo os autores, ela tem pouco efeito sobre o comportamento do modelo. O funcionamento desse modelo é bastante similar ao do proposto pelo IEEE. As curvas características dos elementos A_0 e A_1 podem ser vistas no trabalho de Pinceti et al. [4].

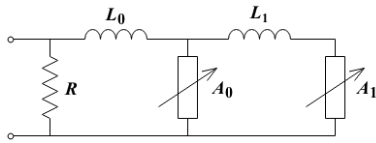


Figura 2. Modelo proposto por Pinceti et al.

D. Modelo de Popov et al.

Popov et al. propuseram uma simplificação do modelo de Schmidt [5]. Na Fig. 3, a resistência não linear representa a alta não linearidade do para-raios e é determinada a partir da curva característica do mesmo. A capacitância C_a é a capacitância do bloco de ZnO, que depende da inclinação do transitório da onda de tensão gerado no bloco pelo impulso de corrente. Os parâmetros R e L representam o comportamento físico do grão de ZnO, mas quando o para-raios é ligado ao transformador, estes parâmetros dependem também do laço de indutância formado pela conexão entre o para-raios e o transformador. A indutância é estimada a partir da distância do para-raios com os

terminais do transformador e é da ordem de 5-20 $\mu\text{H/m}$. Já a capacitância é da ordem de 1,5 nF/kV quando o para-raios é ligado a transformadores de distribuição e 5 nF/kV quando é ligado a transformadores de estação [6].

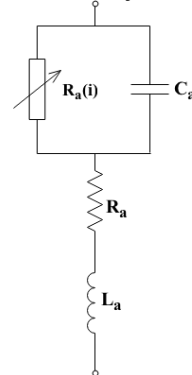


Figura 3. Modelo proposto por Popov et al.

III. METODOLOGIA

O método aplicado neste trabalho foi proposto por Lira [7] e baseia-se no ajuste da forma de onda da tensão residual fornecida pelo modelo à medida em laboratório durante ensaios de tensão residual para impulsos de corrente atmosféricos (forma de onda 8/20 μs), realizados em varistores de ZnO. A qualidade dos ajustes dos parâmetros foi quantificada através do coeficiente de determinação R^2 . Em todos os casos analisados, obteve-se valores de R^2 maiores que 0,96, indicando assim, que cerca de 96% do comportamento da forma de onda da tensão residual medida pôde ser representada pelo modelo do IEEE ajustado. Estes resultados validam o método de estimação de parâmetros proposto.

Um problema em que se deseja ajustar um modelo a um conjunto de dados medidos em laboratório é um problema de mínimos quadrados. Neste caso, a função que se deseja minimizar é definida como:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [r_j(\mathbf{x})]^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{r}(\mathbf{x})\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{r}(\mathbf{x})^T \mathbf{r}(\mathbf{x}), \quad (2)$$

onde $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ é uma função vetorial $\mathbf{r}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, com $m \geq n$ (m é o número de pontos medidos em laboratório e n é o número de parâmetros do vetor $\mathbf{x}$). Para cada $\mathbf{x}$ escolhido, é possível calcular o valor da função $\mathbf{r}(\mathbf{x})$, a qual é chamada de *resíduo* e dada por:

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \mathbf{v}_m - \mathbf{v}_1, \quad (3)$$

onde $\mathbf{x}$ é o vetor paramétrico, $\mathbf{v}_m$ é o vetor das tensões residuais medidas e $\mathbf{v}_1$ é o vetor das tensões residuais obtidas pelo modelo.

No trabalho de Lira, a função da Equação 2 foi minimizada pelo método de otimização de Levenberg-Marquardt. Neste trabalho, além deste método, utilizou-se o método simplex, o *shuffled complex evolution* e um algoritmo genético. Uma breve explanação sobre cada um destes métodos será dada a seguir.

A. Métodos de otimização

O método de Levenberg-Marquardt é um método iterativo baseado no método de Gauss-Newton, com uma pequena modificação. O método de Gauss-Newton utiliza uma aproximação quadrática da função $f(\mathbf{x})$ na vizinhança de $\mathbf{x}$. Expandindo-se $f(\mathbf{x})$ em uma série de Taylor tem-se:

$$f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}^T(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) + \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)^T \mathbf{H}^T(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) \quad (4)$$

onde:

$\mathbf{x}_i$ é a estimativa inicial para o mínimo da função;

$\mathbf{g} = \nabla f(\mathbf{x}_i)$ é o vetor gradiente em $\mathbf{x}_i$;

$\mathbf{H} = \nabla^2 f(\mathbf{x}_i)$ é a matriz hessiana em $\mathbf{x}_i$.

O gradiente e a hessiana podem ser definidos em função da jacobiana, uma matriz que contém as derivadas parciais de primeira ordem de $\mathbf{r}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{r}(\mathbf{x}), \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{J}, \quad (6)$$

onde:

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}(\mathbf{x}))_{ij} = \frac{\partial r_i}{\partial x_j}(\mathbf{x}). \quad (7)$$

Pelo Teorema das Condições Necessárias de Primeira Ordem, $\nabla f(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, logo

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i - \mathbf{H}^{-1} \mathbf{g} \quad (8)$$

A partir desta equação, pode-se obter a nova estimativa $\mathbf{x}_{i+1}$ para o mínimo. Para garantir que a matriz hessiana seja positiva definida, o método de Levenberg-Marquardt sugere que seja somado a ela o termo $\mu \mathbf{I}$, onde μ é uma constante positiva, chamada de parâmetro de *damping* (amortecimento, em português), e $\mathbf{I}$ é a matriz identidade. Então, calcula-se a nova estimativa $\mathbf{x}_{i+1}$ através da equação:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i - (\mathbf{H} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{g}. \quad (9)$$

A cada iteração, o valor de μ é atualizado.

No método simplex (um *simplex* é um conjunto de $n+1$ pontos em um espaço n -dimensional) de Nelder e Mead, a ideia básica é comparar os valores da função objetivo nos $n+1$ vértices de um simplex arbitrário e mover o *simplex* gradualmente em direção ao ponto ótimo durante o processo iterativo. O movimento do simplex é realizado pelo uso de três operações, definidas como reflexão, contração e expansão.

O método *Shuffled Complex Evolution* (SCE) é uma estratégia de otimização global baseado em quatro conceitos: (a) combinação de abordagens probabilísticas e determinísticas; (b) agrupamento; (c) evolução sistemática de um complexo de pontos que abrangem o espaço; e (d) evolução competitiva [8]. A filosofia do método é comparada com o processo de evolução natural. Em primeiro lugar, uma população de pontos é gerada aleatoriamente dentro do conjunto de restrições e o valor da função em cada ponto é calculado. Em seguida, os pontos são classificados em ordem crescente de valor da função. O próximo passo é particionar a população em complexos (comunidades) e cada um é desenvolvido de forma independente por um algoritmo chamado evolução complexa competitivo (CCE – *Competitive Complex Evolution*), que é baseado no método simplex. Cada comunidade pode gerar descendentes (novos pontos) a partir de um subcomplexo selecionado de acordo com uma distribuição de probabilidade que favorece os melhores pontos. O novo ponto gerado substitui o pior ponto do subcomplexo. Após o processo de evolução, as comunidades são misturadas para formar novas comunidades e os pontos são ordenados novamente. Este processo é repetido até que os critérios de convergência sejam satisfeitos.

Um algoritmo genético é um algoritmo baseado nos princípios da genética e da seleção natural. Os elementos básicos da genética natural – população de cromossomos, seleção de acordo com a aptidão, reprodução, cruzamento e mutação aleatória – são utilizados no procedimento de busca

genética. Os cromossomos em uma população AG tem a forma de *strings* de bits. Cada *locus* no cromossomo tem dois possíveis alelos: 0 e 1. Cada cromossomo pode ser pensado como um ponto no espaço de busca de soluções. Os operadores dos AGs são: 1) Seleção: seleciona cromossomos para reprodução. Quanto mais apto o cromossomo, mais chance ele tem de ser selecionado. 2) Cruzamento: escolhe aleatoriamente um *locus* e troca os antecedentes e os sucessores entre dois cromossomos para gerar filhos. 3) Mutação: inverte aleatoriamente alguns dos bits de um cromossomo.

B. Ensaios em laboratório

O objetivo dos ensaios é obter a resposta em tensão dos varistores de ZnO frente à diferentes impulsos de corrente. É possível analisar o comportamento dos para-raios ensaiando um único varistor, já que os mesmos são constituídos essencialmente de uma sequência de varistores.

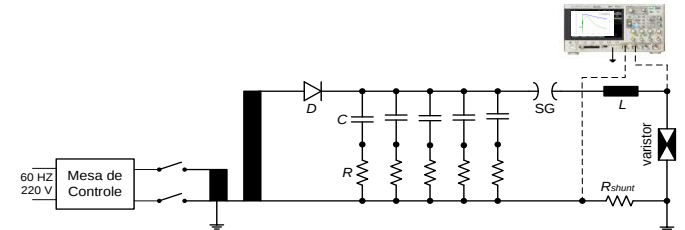


Figura 4. Circuito elétrico do gerador de impulso de corrente do LAT-UFCG.

Os ensaios são realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) com um gerador de impulso de corrente de 80 kJ/100 kV. O gerador possui um transformador de alta tensão conectado a uma fonte de alimentação ac que pode ser ajustada entre 0 e 220 V, capaz de elevar a tensão do secundário a 100 kV. Conectado em série com o transformador encontra-se um diodo, que retifica a tensão que carregará os capacitores. O gerador é formado por oito estágios que são ligados em paralelo, cada um composto por um capacitor de 2 μF ligado em série com um resistor.

Outros componentes do gerador de impulso, observados na Fig. 4, são um centelhador (SG), um indutor (L), o varistor ensaiado e um resistor *shunt* (R_{shunt}) utilizado para medir a corrente que passa pelo varistor. A forma de onda do impulso de corrente depende da quantidade de estágios ligados, dos valores do resistor R , do capacitor C , do indutor L e do próprio varistor.

IV. RESULTADOS

Primeiramente, os parâmetros dos modelos foram calculados conforme sugerido pelos autores dos mesmos. O modelo convencional não possui parâmetros, já que é constituído apenas de uma resistência não-linear cuja característica é determinada pela curva do próprio varistor. Os impulsos a que os modelos foram submetidos foram o de 4/10 μs com amplitude de 10 kA, o de 8/20 μs com amplitude de 10 kA e o de 30/60 μs com amplitude de 2 kA.

Os ajustes foram analisados por meio de três parâmetros: a estatística R^2 , o erro de energia e o erro do valor de pico da tensão residual. A estatística R^2 é definida como sendo 1 menos a razão entre a soma quadrática dos erros entre a curva medida e a curva calculada (SSE) e a soma quadrática dos erros entre a curva calculada e a média do sinal medido (SST), ou seja:

$$R^2 = 1 - SSE/SST, \quad (10)$$

onde:

$$SSE = \sum_{j=1}^m [\mathbf{v}_m(j) - \mathbf{v}_1(j)]^2, \quad (11)$$

$$SST = \sum_{j=1}^m [\mathbf{v}_m(j) - \bar{\mathbf{v}}_m]^2. \quad (12)$$

O erro de energia é dado por:

$$\varepsilon_{en} = \frac{|E_c - E_m|}{E_m} \times 100\%, \quad (13)$$

em que E_c é a energia para a tensão residual calculada e E_m é a energia para a tensão residual medida.

O erro do valor de pico da tensão residual é igual a:

$$\varepsilon_{vrp} = \frac{|\max(\mathbf{v}_1) - \max(\mathbf{v}_m)|}{\max(\mathbf{v}_m)} \times 100\%. \quad (14)$$

Na Tabela I, estão os resultados referentes ao modelo convencional. O modelo respondeu de forma moderada aos impulsos de 4/10 μs e 8/20 μs , com R^2 igual a 0,658 e 0,711, respectivamente, e com erros de energia e de valor de pico da tensão consideravelmente baixos. Mas para o impulso de 30/60 μs , o modelo não se aproximou da curva medida, obtendo-se um R^2 igual a 0,176, e com os erros de energia e de valor de pico da tensão um pouco acima dos 5%. As formas de onda obtidas podem ser vistas nas Figs. 5 a 7.

Para o modelo do IEEE, após a estimação dos parâmetros, houve melhoria do R^2 em todos os casos, e apenas o erro do valor de pico da tensão residual superou os 5% para o impulso de 8/20 μs . Todas as estatísticas referentes ao modelo do IEEE estão na Tabela II, e os gráficos, nas Figs. 8 a 10.

Para o modelo de Pinceti *et al.*, também houve melhoria no valor do R^2 em todos os casos, apesar de que no caso do impulso de 30/60 μs , este valor permaneceu abaixo do esperado, e os erros de energia e de valor de pico da tensão residual atingiram aproximadamente 9,5% e 7,2%, respectivamente. Todas as estatísticas referentes ao modelo de Pinceti *et al.* se encontram na Tabela III e nas Figs. 11 a 13.

O modelo de Popov *et al.* foi o que resultou nas melhores estatísticas após a estimação de seus parâmetros. Os resultados referentes a este modelo se encontram na Tabela IV e nas Figs. 14 a 16. Apesar dos bons resultados, constatou-se oscilações nas formas de onda das tensões residuais. Oscilações não são desejáveis, pois podem conduzir a problemas de instabilidade numérica.

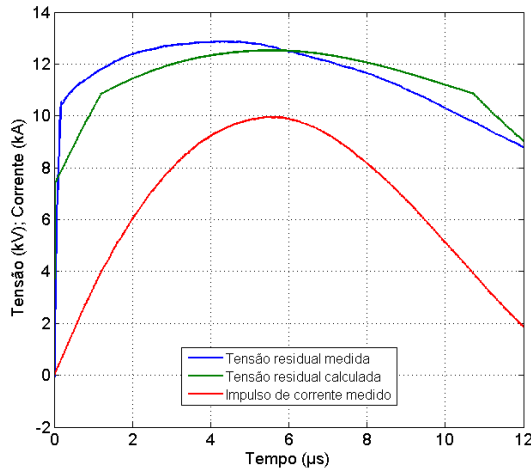


Figura 5. Modelo convencional, impulso de 4/10 μs .

TABELA I. RESULTADOS PARA O MODELO CONVENCIONAL

Impulso	R^2	$\varepsilon_{en} (\%)$	$\varepsilon_{vrp} (\%)$
4/10 μs	0,658	0,634	2,747
8/20 μs	0,711	1,481	0,003
30/60 μs	0,176	5,936	5,356

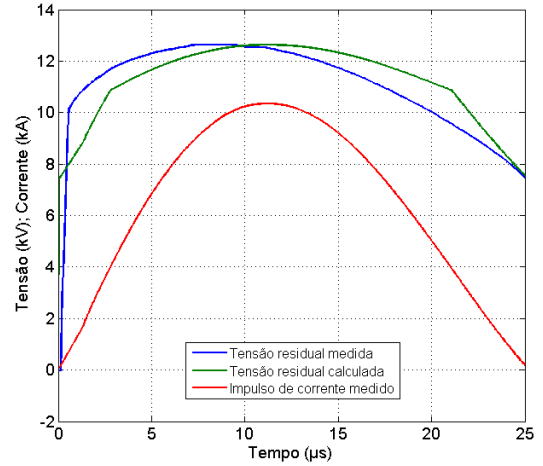


Figura 6. Modelo convencional, impulso de 8/20 μs .

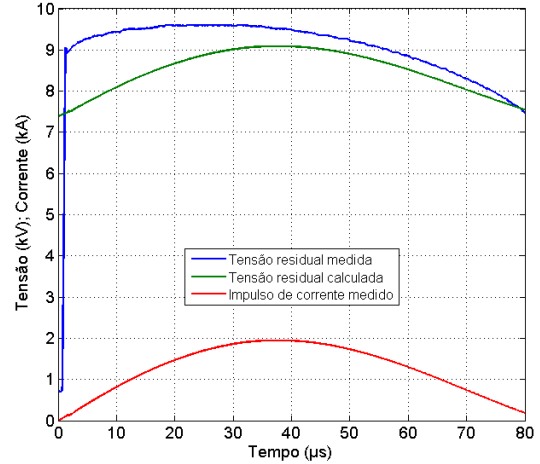


Figura 7. Modelo convencional, impulso de 30/60 μs .

TABELA II. RESULTADOS PARA O MODELO DO IEEE

	Método	R^2	$\varepsilon_{en} (\%)$	$\varepsilon_{vrp} (\%)$
Impulso 4/10 μs	Sem otimização	0,629	3,446	4,755
	AG	0,695	4,524	4,095
	LM	0,695	4,043	4,321
	SCE	0,695	3,797	4,043
	Simplex	0,708	4,389	3,723
Impulso 8/20 μs	Sem otimização	0,718	2,477	0,004
	AG	0,826	3,754	3,196
	LM	0,838	4,478	5,383
	SCE	0,841	4,673	5,442
	Simplex	0,841	4,660	5,450
Impulso 30/60 μs	Sem otimização	0,207	9,872	10,908
	AG	0,908	1,304	2,838
	LM	0,912	0,615	2,304
	SCE	0,910	1,256	2,903
	Simplex	0,911	0,612	2,349

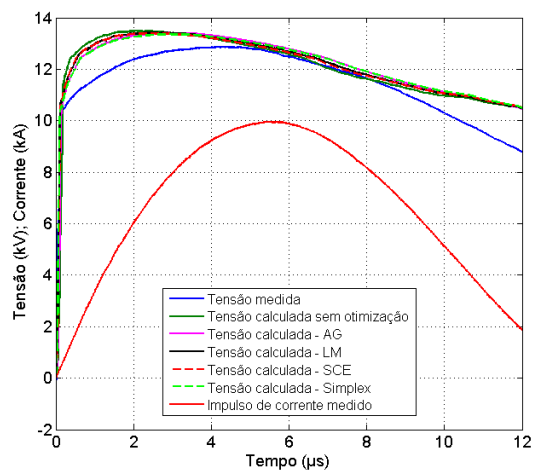


Figura 8. Modelo do IEEE, impulso de 4/10 μ s.

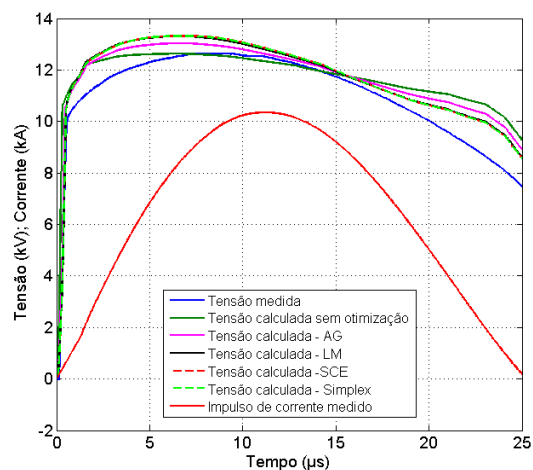


Figura 9. Modelo do IEEE, impulso de 8/20 μ s.

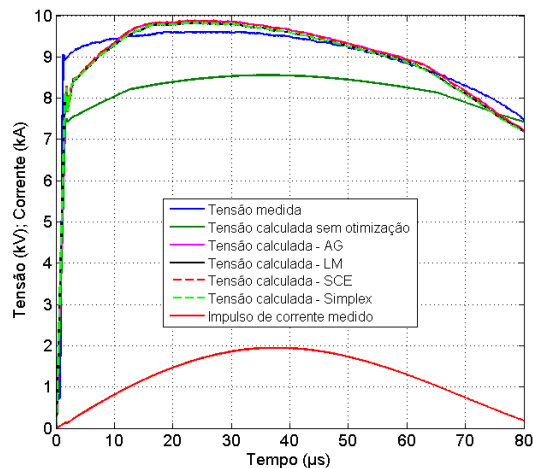


Figura 10. Modelo do IEEE, impulso de 30/60 μ s.

TABELA III. RESULTADOS PARA O MODELO DE PINCETI *ET AL.*

	Método	R^2	$e_{en}(\%)$	$e_{vp}(\%)$
Impulso 4/10 μ s	Sem otimização	0,429	5,150	0,629
	AG	0,664	4,351	3,847
	LM	0,657	4,474	2,660
	SCE	0,666	4,465	3,852
	Simplex	0,668	4,477	3,880
Impulso 8/20 μ s	Sem otimização	0,427	5,085	0,719
	AG	0,815	4,065	3,564
	LM	0,818	4,127	4,657
	SCE	0,818	4,120	4,689
	Simplex	0,819	4,125	4,697
Impulso 30/60 μ s	Sem otimização	0,186	9,510	11,093
	AG	0,322	9,447	7,243
	LM	0,330	9,521	7,219
	SCE	0,332	9,584	7,158
	Simplex	0,332	9,583	7,153

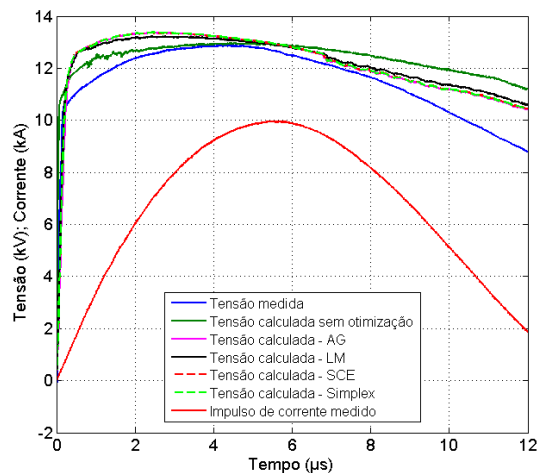


Figura 11. Modelo de Pinceti *et al.*, impulso de 4/10 μ s.

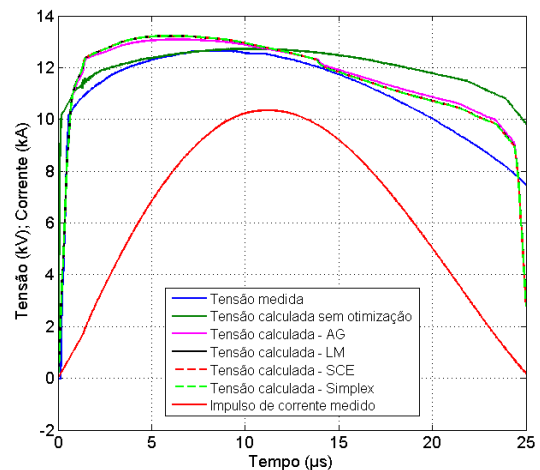


Figura 12. Modelo de Pinceti *et al.*, impulso de 8/20 μ s.

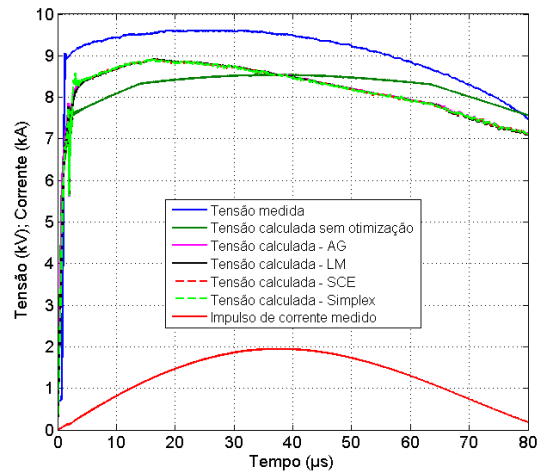


Figura 13. Modelo de Pinceti *et al.*, impulso de 30/60 μ s.

TABELA IV. RESULTADOS PARA O MODELO DE POPOV *ET AL.*

	Método	R^2	e_{en} (%)	e_{vrp} (%)
Impulso 4/10 μ s	Sem otimização	0,125	10,352	10,327
	AG	0,957	0,032	1,121
	LM	0,965	0,631	1,435
	SCE	0,968	0,125	0,956
	Simplex	0,968	0,000	0,831
Impulso 8/20 μ s	Sem otimização	0,255	13,012	13,769
	AG	0,945	3,140	4,330
	LM	0,967	1,564	2,624
	SCE	0,960	2,163	3,271
	Simplex	0,967	1,477	2,515
Impulso 30/60 μ s	Sem otimização	0,413	3,177	1,947
	AG	0,779	0,011	2,203
	LM	0,827	0,006	12,439
	SCE	0,786	0,005	2,219
	Simplex	0,827	0,002	12,908

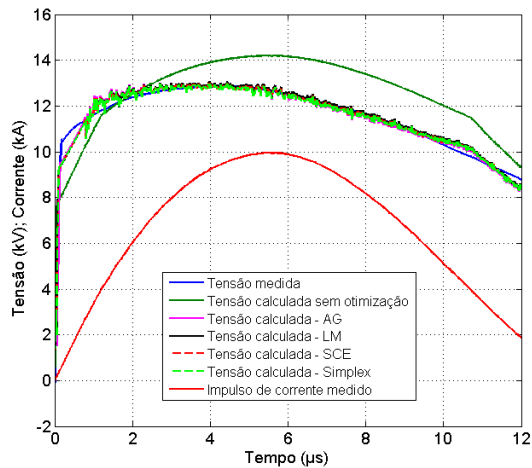


Figura 14. Modelo de Popov *et al.*, impulso de 4/10 μ s.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma técnica de estimação de parâmetros de modelos de para-raios de ZnO, com o objetivo de obter respostas mais confiáveis nas simulações dos sistemas elétricos de potência que envolvem este equipamento.

Os resultados mostram que a técnica de estimação de parâmetros é adequável a qualquer modelo e sempre leva a melhores resultados no que diz respeito ao parâmetro R^2 , que é bastante utilizado na análise de problemas de mínimos quadrados ou de ajuste de curvas.

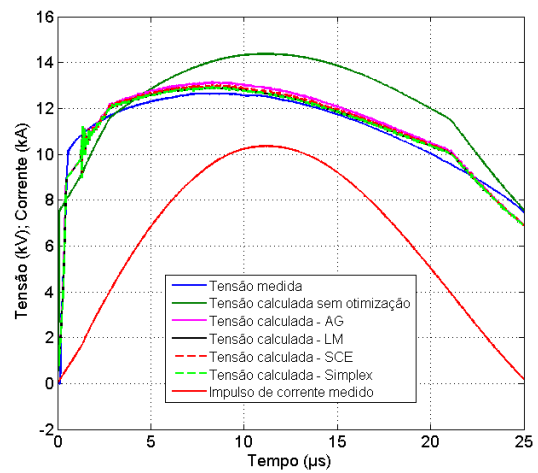


Figura 15. Modelo de Popov *et al.*, impulso de 8/20 μ s.

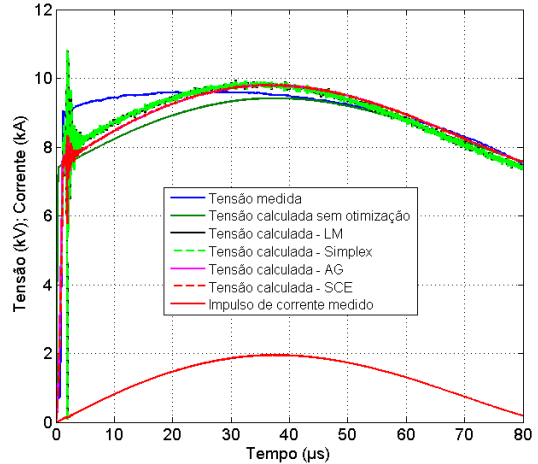


Figura 16. Modelo de Popov *et al.*, impulso de 30/60 μ s.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo incentivo à iniciação científica, que possibilitou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program Manual (EMTP Theory Book)". Vancouver B.C., Canada: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- [2] J. A. Martinez, D. W. Durbak, "Parameter Determination for Modeling Systems Transients - Part V: Surge Arresters". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 3, p. 2073–2078, July 2005.
- [3] IEEE W. G. 3.4.11, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 302–309, January 1992.
- [4] P. Pinceti, M. Giannetoni, "A Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 2, p. 393–398, April 1999.
- [5] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl, D. Qiu, "Behavior of MO- Surge Arrester Blocks to Fast Transients". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, N° 1, pp. 292–300, 1989.
- [6] M. Popov, L. van der Sluis, G. C. Paap, "Investigation of the Circuit Breaker Reignition Overvoltages Caused by No-load Transformer Switching Surges". ETEP, Vol. 11, No. 6, November/December 2001.
- [7] G. R. S. Lira, "Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Para-Raios de Óxido de Zinco". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- [8] Q. Duan, V. K. Gupta, S. Sorooshian, "Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization", Journal of Optimization Theory and Its Applications, Vol 61(3), 1993.