

Proposta de Melhoria de um Modelo de Falta de Alta Impedância

Caio Marco dos Santos Junqueira¹, Érica Manguiera Lima¹, Wellinsilvio Costa dos Santos¹,

Hotoniones Bezerra da Silva², Núbia Silva Dantas Brito³, Benemar Alencar de Souza³, Rafaella Nascimento Meira²

1 - Aluno (a) do Programa de Pós-Graduação, 2 – Aluno (a) de Graduação, 3 – Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande

Campina Grande, Brasil

caio.junqueira@ee.ufcg.edu.br, erica.lima@ee.ufcg.edu.br, wellinsantos@gmail.com, hotoniones.silva@ee.ufcg.edu.br,
nubia@dee.ufcg.edu.br, benemar@dee.ufcg.edu.br, rafaella.meira@ee.ufcg.edu.br

Resumo — As dificuldades de obtenção de dados reais instigam os pesquisadores ao uso de modelos, que apresentam como vantagens o controle sobre o processo e, diferentemente da aleatoriedade dos eventos reais, não comprometem a operação do sistema. Entretanto, a qualidade dos resultados é função do modelo utilizado. No caso das faltas de alta impedância, alguns modelos propostos na literatura especializada utilizam resistências para representar suas características, cujas estimativas podem ser melhoradas. A representação das resistências por aproximações matemáticas permite a utilização de um modelo, sem a necessidade de acesso aos dados reais dos experimentos. Este artigo apresenta os resultados de um estudo de ajuste de curvas visando melhoria na representação de uma das resistências de um desses modelos.

Palavras-chave— faltas de alta impedância, aproximações matemáticas, ajuste de curvas.

I. INTRODUÇÃO

Dentre as muitas perturbações que podem ocorrer nos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE), as faltas de alta impedância (FAI) são consideradas ainda hoje, uma das mais preocupantes. De forma resumida, uma FAI ocorre quando um condutor primário energizado entra em contato com uma superfície de alta impedância, resultando em correntes de falta de baixa amplitude, que muitas vezes, são da mesma ordem de grandeza de outros fenômenos, tais como energização de cargas e chaveamento de capacitores. Como resultado, o sistema de proteção tradicional por sobrecorrente pode não ser sensibilizado, podendo provocar risco à vida humana.

Na grande maioria das distribuidoras nacionais, o informe sobre uma FAI ainda se dá por meio da reclamação dos clientes, o que resulta em um processo de extinção demorado, comprometendo os indicadores de qualidade. Visando melhoria da qualidade do serviço, a investigação do uso de técnicas que automatizem esse processo constitui atualmente, uma linha de pesquisa importante para o estado da arte.

A etapa crucial desse processo é sem dúvida, a modelagem do fenômeno. No caso de uma FAI, essa etapa é ainda mais complexa, haja vista as peculiaridades das correntes resultantes, tais como: assimetria entre os semiciclos, não-linearidade, crescimento gradativo seguido de intervalos de constância e descontinuidades

[1]-[2]. Portanto, um modelo que englobe todas essas características simultaneamente, constituir-se-á em aporte importante para o estado da arte. No caso das FAI, dentre os diversos modelos propostos na literatura especializada, o modelo proposto por [3] pode ser considerado um dos mais completos. Um estudo minucioso, mostrou que uma melhoria importante seria a reutilização do modelo, prescindindo da construção de uma base de dados experimental extensa.

Este artigo se insere neste contexto e propõe um ajuste de curvas para a resistência variável que simula as características de não-linearidade e assimetria da FAI, atuando nos regimes transitório e permanente. O ajuste sugerido é apresentado em termos de uma equação algébrica com apenas quatro parâmetros e validado a partir da comparação com outros ajustes mais usuais.

II. FUNDAMENTOS DE UMA FAI

Uma FAI é um curto-circuito que ocorre normalmente, em sistemas de média tensão, quando um condutor energizado entra em contato com uma superfície de alto valor resistivo, como por exemplo: asfalto, brita, grama, areia, ou até mesmo, devido ao contato do condutor com galhos de uma árvore, sem que o cabo se parta. Devido às suas características peculiares, normalmente, uma FAI não é extinta pelo sistema de proteção convencional, especialmente porque a amplitude da corrente de falta neste caso é semelhante à absorvida por cargas comuns em um SDEE. Portanto, os relés de sobrecorrente podem interpretar a FAI como a entrada de uma carga no sistema [4].

Uma característica determinante na corrente de uma FAI é a presença do arco elétrico, o qual é resultante da ruptura dielétrica do ar existente entre o condutor energizado e a superfície de contato [5]. Atualmente, vários estudos vêm sendo realizados com arcos elétricos, porém, a maioria deles considera valores altos de corrente de falta e características fortemente indutivas. Consequentemente, essas análises não são aplicáveis ao caso de FAI, pois além de possuir um baixo valor de corrente de falta, ela é predominantemente resistiva.

De acordo com [3], a presença do arco provoca o surgimento de atributos distintivos na forma de onda da corrente proveniente de uma FAI, como por exemplo:

- A corrente possui picos diferentes para os semiciclos positivo e negativo, característica denominada assimetria.
- A não-linearidade da curva $v \times i$ provoca distorções na forma de onda.
- A amplitude da corrente apresenta um crescimento gradual por vários ciclos, chamado de *build-up* e períodos de constância denominado de *shoulder*.
- A penetração do arco na superfície de alta impedância gera uma tendência de diminuição da umidade da região, diminuindo a energia cinética dos elétrons livres e forçando a extinção do arco. Porém, a umidade de outra região próxima ao condutor pode difundir-se provocando a reignição do arco. Esse processo é conhecido como intermitência.

Tais características dependem das condições geométricas espaciais, ambientais e elétricas do sistema [6]. Por mais que um modelo apresente todas ou algumas dessas características, a FAI apresenta uma forte componente estocástica que deve ser levada em consideração no desenvolvimento do modelo. Um exemplo de uma oscilografia real de uma FAI é apresentado na Fig. 1.

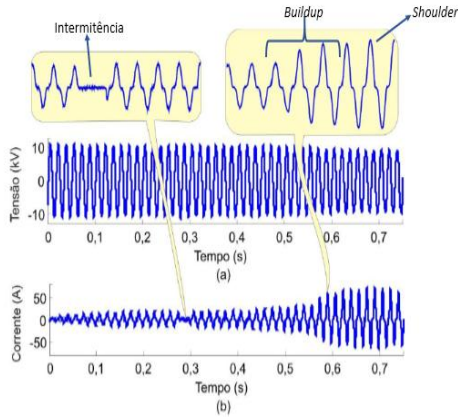


Fig. 1 Oscilografia de uma FAI: (a) tensão; (b) corrente [3].

III. O MODELO DA FAI

O modelo proposto por [3] baseou-se nos modelos propostos por [7] e [8]. Ao final, [3] construiu um modelo capaz de reproduzir as principais características de uma FAI, ou seja: não-linearidade, assimetria, intermitência, *build-up* e *shoulder*. A construção do modelo baseou-se nos registros obtidos em ensaios de campo, considerando sete tipos de superfícies: grama, calçamento, brita, asfalto, areia, terra local e arbusto. Para todas as superfícies, foram feitos ensaios em superfícies secas e molhadas.

O modelo foi programado no software *Alternative Transient Program* (ATP) e possui (Fig. 2) [9]:

- Uma chave simples (TCSC – *Thyristor Controlled Series Compensation*), controlada por TACS (*Transient Analysis of Control Systems*), que é um módulo de simulação presente no ATP que possibilita a simulação e análise dos sistemas de controle. Essa chave tem como finalidade iniciar a falta e simular as discontinuidades na corrente. Foi criada devido ao fato que, nos casos em que ocorre intermitência, o arco elétrico costuma cessar no zero da tensão e após alguns ciclos, ocorre uma reignição próxima ao pico de tensão.

- Uma chave comum, à jusante do ponto de falta que simula o rompimento do condutor.
- Duas resistências variantes no tempo (RVT) em série, controladas por TACS:
 - R_1 : simula as características de não-linearidade e assimetria da FAI, atuando nos regimes transitório e permanente. Seu valor é praticamente constante durante o período de falta e relaciona-se com o formato da onda da corrente de falta.
 - R_2 : simula os fenômenos de *build-up* e *shoulder*. Relaciona-se com a variação de amplitude da corrente de falta e quase não tem influência no regime permanente de falta.

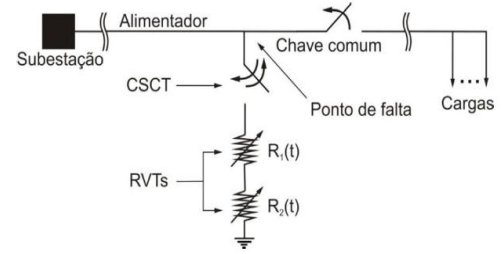


Fig. 2 Modelo de FAI proposto por [3].

A estimação das resistências foi feita conforme a seguir.

- R (resistência total): razão entre os valores máximos de tensão pelos valores máximos de corrente.
- R_1 : razão entre a tensão e a corrente, considerando um ciclo do estado permanente de falta.
- $R_2 = R - R_1$.

Durante o processo de construção do modelo, [10] propôs o uso de uma função exponencial para aproximar R_2 . Esse processo é ilustrado nas Figs. 3 e 4.

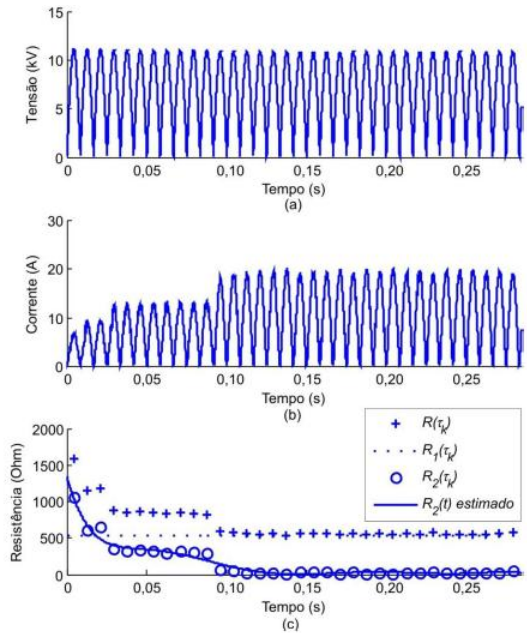


Fig. 3 Cálculo de R_2 : (a) Valor absoluto da tensão referente à FAI; (b) Valor absoluto da corrente referente à FAI; (c) Resistência x tempo [10].

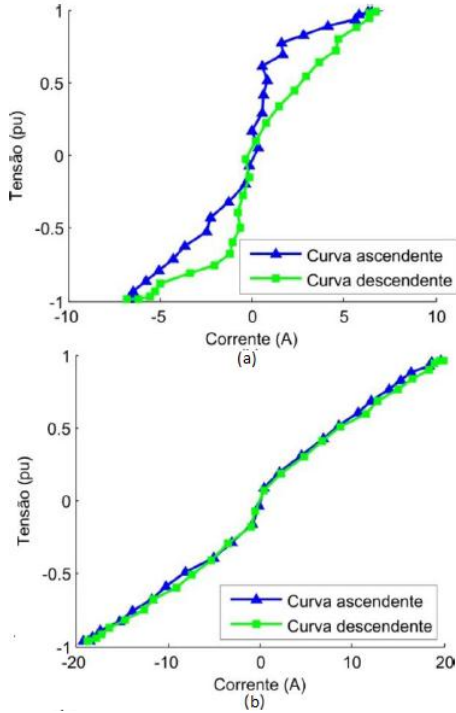


Fig. 4 Curvas $v \times i$ correspondentes a um ciclo de regime permanente de uma FAI (influência apenas de R_1): (a) asfalto; (b) calçamento [9].

Estudo detalhado desse modelo mostrou que a assimetria existente entre os semiciclos positivos e negativos e a não-linearidade contraindicam o uso de funções polinomiais ou exponenciais para aproximar a resistência R_2 . Portanto, aplicação de técnicas de ajuste de curvas pode contribuir para tornar o modelo de [3] ainda mais realístico. Neste sentido, realizou-se um estudo de ajuste de curvas visando seleção da função que melhor se ajustasse à resistência R_2 , o qual é apresentado a seguir.

IV. CURVA DE HISTERESE

Antes de iniciar o processo de ajuste de curvas propriamente dito, uma análise minuciosa das curvas $v \times i$ referentes ao regime permanente da FAI (ou seja, onde só há influência de R_1) mostrou que tais curvas apresentam características semelhantes às de uma curva de histerese. A histerese é a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou, podendo ser encontrada em diferentes manifestações. Sucintamente, o fenômeno da histerese pode ser descrito como a seguir.

Quando um fluxo magnético (B) aplicado a um material ferromagnético é aumentado até a saturação e em seguida, reduzido, a densidade de fluxo não diminui tão rapidamente quanto o campo magnético (H). Como consequência, quando H chega a zero, ainda existe uma densidade de fluxo remanescente, B_r . Para que B chegue a zero, é necessário aplicar um campo negativo, chamado de força coercitiva. Se H continuar aumentando no sentido negativo, o material é magnetizado com polaridade oposta.

Segundo [11], os trechos ascendente e descendente da histerese do laço principal podem ser representado pela Eq. (1):

$$M = F_L(H) \triangleq \frac{2}{\pi} M_s \arctan\left(\frac{H - \delta H_c}{h_0}\right), \quad (1)$$

sendo: M_s a magnetização de saturação; H_c o campo coercitivo; h_0 uma constante que depende do material e $\delta = \text{sgn}(H)$. A curva de histerese com os parâmetros propostos por [11] é ilustrada na Fig. 5.

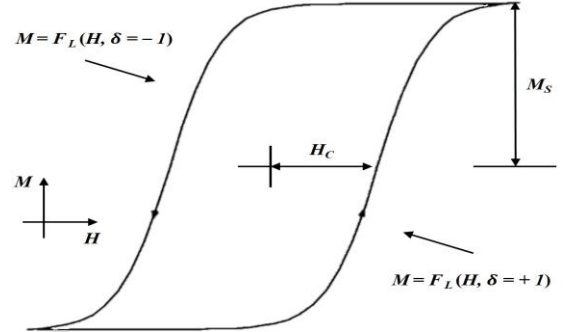


Fig. 5 Representação esquemática de uma histerese.

O modelo proposto por [11] divide o problema em duas partes (ascendente e descendente), o que facilita ainda mais o cálculo do ajuste de curvas.

Conforme se observou, os parâmetros M_s e H_c são fornecidos pelos dados experimentais, porém h_0 não é obtido tão facilmente. Segundo [11], este valor pode ser obtido resolvendo um problema de otimização conforme Eq. (2):

$$h_{0 \min} = \min \sum_{\zeta=-1}^1 (M_{\zeta=-1} - F_L(H, F_L(H, \zeta = -1)))^2 + \sum_{\zeta=+1}^1 (M_{\zeta=+1} - F_L(H, F_L(H, \zeta = +1)))^2, \quad (2)$$

sendo M , os valores dos dados experimentais.

V. ETAPA DE AJUSTE DE CURVAS

Sem rigor matemático, ajuste de curvas pode ser definido como uma técnica que consiste em procurar uma curva que se ajuste a um conjunto de dados, considerando uma série de parâmetros adicionais. A avaliação da qualidade do ajuste é feita normalmente por meio do cálculo do coeficiente de determinação:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}_1}{\sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}_{\text{imed}}} \right)^2, \quad (3)$$

sendo: y_i os valores da amostra i dos dados experimentais; $\bar{y}_1$ os valores da amostra i da curva ajustada e $\bar{y}_{\text{imed}}$, a média dos valores experimentais. Os valores do coeficiente R^2 variam entre 0 e 1, de modo que quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste.

É importante destacar que o estudo realizado neste trabalho considerou todas as superfícies de contato, entretanto para ilustrar, selecionou-se apenas a superfície asfalto. A razão dessa escolha se deve ao fato do asfalto ter sido a superfície que resultou no ajuste mais crítico.

Inicialmente, a título de comparação, fez-se um ajuste para as curvas da Fig. 4 utilizando o *toolbox cftool* do *software MATLAB™*, que forneceu os melhores resultados considerado as funções *Soma de senos* e *Fourier* (Figs. 6, 7, 8 e 9).

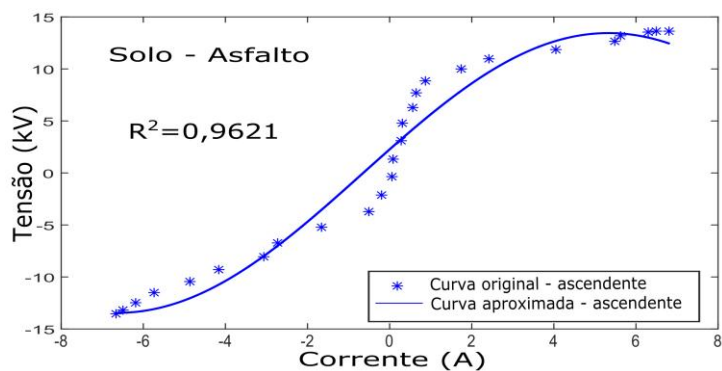


Fig. 6 Ajuste pela Soma de senos (ciclo ascendente).

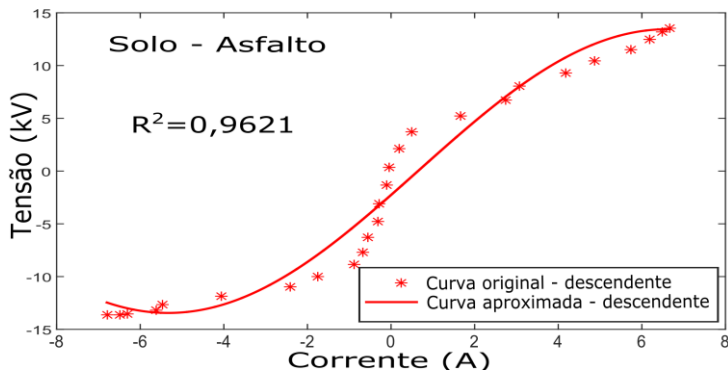


Fig. 7 Ajuste pela Soma de senos (ciclo descendente).

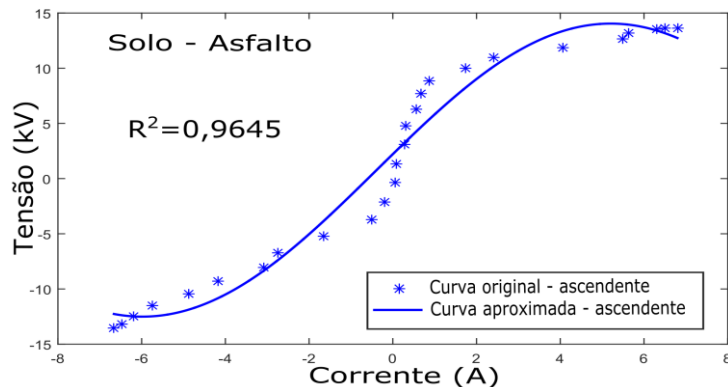


Fig. 8 Ajuste por Fourier (ciclo ascendente).

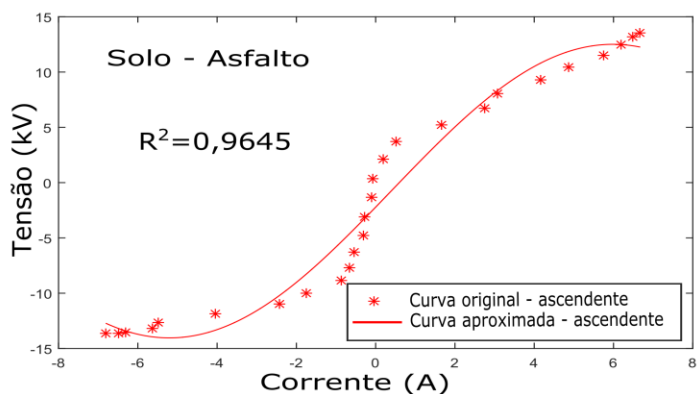


Fig. 9 Ajuste por Fourier (ciclo descendente).

Em seguida, procedeu-se à aplicação da Eq. (2) ao problema em questão (curvas da Fig. 4), conforme a seguir.

- Substituição das variáveis H e M por i (corrente) e v (tensão), respectivamente.
- Obtenção de M_s (tensão máxima da curva) e H_c (valor de i para $v=0$), os quais são fornecidos pelos dados experimentais.
- Programação de um código no software MATLAB™ visando obtenção do valor de h_0 .

O ajuste obtido é apresentado nas Fig. 10 e 11 (referentes ao semiciclo ascendente e descendente, respectivamente), denominada de Histerese I.

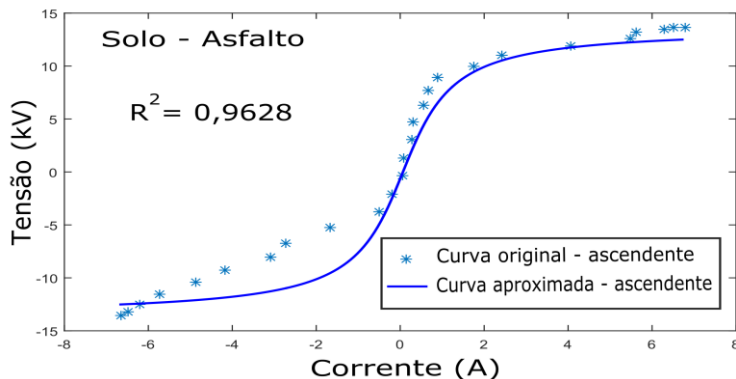


Fig.10 Ajuste por [9] (ciclo ascendente).

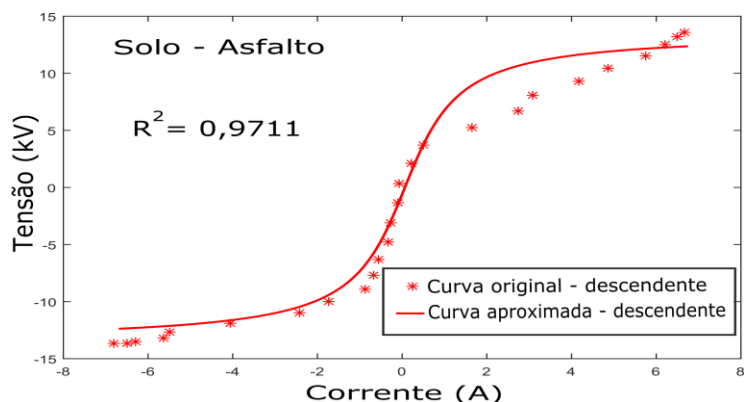


Fig.11 Ajuste por [9] (ciclo descendente).

Na busca por resultados ainda mais satisfatórios, os semiciclos ascendente e descendente foram divididos em duas partes: uma parte considerando os valores de correntes maiores que zero e a outra parte, os valores menores que zero, o que resultou na curva denominada de Histerese II.

Após análise das curvas $v \times i$ para todas as superfícies em estudo, observou-se que existe uma região próxima dos valores de corrente nulos que possuem uma característica peculiar e que deveria ser levada em consideração. Isso foi feito dividindo cada semiciclo em três regiões: pré-transição, transição e pós-transição (Fig. 12). Para cada região, fez-se novo ajuste, o que resultou na curva Histerese III. Esse procedimento foi adotado para todas as superfícies de contato, de modo que diferentes regiões de transição foram estabelecidas, com base nas respectivas curvas $v \times i$. Os valores de h_0 foram calculados para cada região dos semiciclos.

Para um ajuste ainda mais confiável, foram obtidos os melhores valores de M_s e H_c , identificados da seguinte maneira: primeiro foram obtidos os valores de M_s por otimização (segundo o mesmo raciocínio para o cálculo de h_0) e em seguida, foram obtidos os valores de H_c , também por otimização. Os resultados foram obtidos para cada região dos trechos ascendentes e descendentes.

Ao final, o melhor ajuste obtido para a superfície asfalto, com seu respectivo coeficiente de determinação, são ilustrados nas Fig. 13 e 14 (semiciclo ascendente e descendente, respectivamente). Os coeficientes de determinação para todos os tipos de superfície e para todas as curvas estão apresentados na Tabela I e na Tabela II, as equações propostas para os diversos ajustes.

Os modelos de Fourier e de Soma de seno apesar de apresentarem um bom coeficiente de determinação (acima de 0,99) para algumas superfícies em estudo, não levaram em consideração as características encontradas na região de transição.

Dentre os modelos apresentados, os baseados na curva de histerese apresentaram os melhores coeficientes de determinação para a maioria das superfícies.

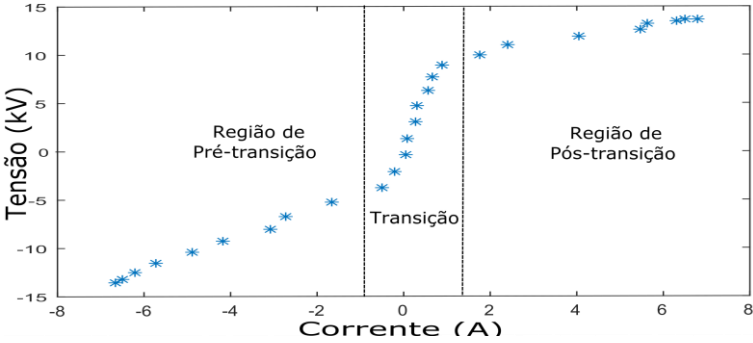


Fig. 12 Regiões divididas para o ajuste.

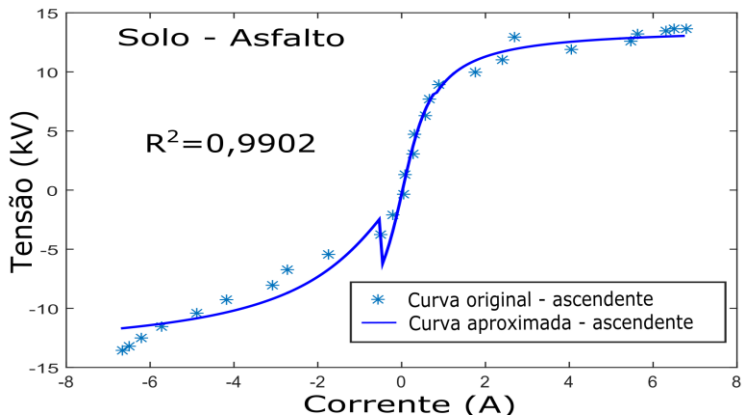


Fig. 13 Ajuste de curvas proposto para o semiciclo ascendente.

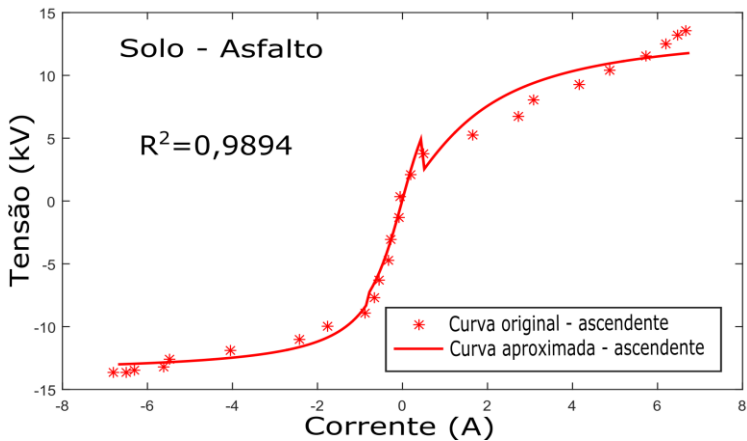


Fig. 14 Ajuste de curvas proposto para o semiciclo descendente.

TABELA I. COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO.

		Fourier	Soma de Senos	Histerese I	Histerese II	Histerese III	Ajuste Proposto
Asfalto	Ascend.	0,9645	0,9621	0,9628	0,9897	0,9885	0,9902
	Descend.	0,9645	0,9621	0,9711	0,9872	0,9836	0,9894
Areia	Ascend.	0,9961	0,9961	0,9761	0,9761	0,9762	0,9830
	Descend.	0,9969	0,9969	0,9769	0,9755	0,9768	0,9816
Brita	Ascend.	0,9470	0,9455	0,9864	0,9885	0,9897	0,9831
	Descend.	0,9635	0,9634	0,9786	0,9796	0,9812	0,9848
Calçamento	Ascend.	0,9972	0,9972	0,9758	0,9768	0,9767	0,9822
	Descend.	0,9974	0,9974	0,9712	0,9761	0,9767	0,9833
Grama	Ascend.	0,9967	0,9966	0,9618	0,9814	0,9817	0,9866
	Descend.	0,9973	0,9972	0,9581	0,9802	0,9803	0,9849
Terra	Ascend.	0,9214	0,9207	0,9790	0,9825	0,9893	0,9896
	Descend.	0,9258	0,9247	0,9724	0,9782	0,9762	0,9807
Média		0,9724	0,9717	0,9725	0,9809	0,9814	0,9850

TABELA II. EQUAÇÕES DOS AJUSTES PROPOSTOS.

Asfalto	Ascend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,19 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{1,9010} \right) \right) \quad \forall i < -0,5 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,77 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,021)}{0,5546} \right) \right) \quad \forall -0,5 \leq i < 0,8 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,78 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,061)}{0,5661} \right) \right) \quad \forall i \geq 0,8 \text{ A}$
	Descend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,10 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,010)}{1,7910} \right) \right) \quad \forall i < -0,8 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,79 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,010)}{0,7090} \right) \right) \quad \forall -0,8 \leq i < 0,5 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,80 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,010)}{0,6100} \right) \right) \quad \forall i \geq 0,5 \text{ A}$
Areia	Ascend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,42 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{3,0110} \right) \right) \quad \forall i < -0,25 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,62 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,137)}{3,2317} \right) \right) \quad \forall -0,25 \leq i < 4 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,27 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-1,410)}{2,9363} \right) \right) \quad \forall i \geq 4 \text{ A}$
	Descend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,20 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,01)}{2,6380} \right) \right) \quad \forall i < -1 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,59 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,149)}{3,9880} \right) \right) \quad \forall -1 \leq i < 3 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,46 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,686)}{3,2290} \right) \right) \quad \forall i \geq 3 \text{ A}$
Brita	Ascend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,06 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{3,5451} \right) \right) \quad \forall i < -4 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(11,92 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{2,5057} \right) \right) \quad \forall -4 \leq i < 2 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(12,61 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{3,4437} \right) \right) \quad \forall i \geq 2 \text{ A}$
	Descend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(12,93 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,01)}{6,2410} \right) \right) \quad \forall i < -6 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(12,80 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,01)}{4,8770} \right) \right) \quad \forall -6 \leq i < 5 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(12,90 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,990)}{3,6860} \right) \right) \quad \forall i \geq 5 \text{ A}$
Calçamento	Ascend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,92 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,010)}{4,8320} \right) \right) \quad \forall i < -0,1 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,24 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,010)}{6,2894} \right) \right) \quad \forall -0,1 \leq i < 0,1 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,05 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,010)}{5,8332} \right) \right) \quad \forall i \geq 0,5 \text{ A}$
	Descend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,13 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,01)}{6,5920} \right) \right) \quad \forall i < -1 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,01)}{10,009} \right) \right) \quad \forall -1 \leq i < 1 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,88 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+1,358)}{4,2620} \right) \right) \quad \forall i \geq 1 \text{ A}$
Gramma	Ascend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,40 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{16,5170} \right) \right) \quad \forall i < -3,4 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,55 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,028)}{18,0813} \right) \right) \quad \forall -3,4 \leq i < 13 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,22 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-6,756)}{15,1649} \right) \right) \quad \forall i \geq 13,2 \text{ A}$
	Descend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,38 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,010)}{18,2660} \right) \right) \quad \forall i < -5 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,55 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,010)}{21,2290} \right) \right) \quad \forall -5 \leq i < 10 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(14,41 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+2,692)}{14,7150} \right) \right) \quad \forall i \geq 10 \text{ A}$
Terra	Ascend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,10 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,830)}{5,8470} \right) \right) \quad \forall i < -4 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(11,95 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{1,6192} \right) \right) \quad \forall -4 \leq i < 4 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(12,85 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i-0,001)}{4,7146} \right) \right) \quad \forall i \geq 4 \text{ A}$
	Descend.	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(12,89 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+1,765)}{8,7160} \right) \right) \quad \forall i < -4 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,63 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,001)}{4,3260} \right) \right) \quad \forall -4 \leq i < 4 \text{ A}$	$V(i) = \frac{2}{\pi} \left(13,08 \cdot tg^{-1} \left(\frac{(i+0,001)}{4,2070} \right) \right) \quad \forall i \geq 4 \text{ A}$

VI. CONCLUSÕES

Um estudo de ajuste de curvas visando melhoria da estimativa da resistência variável que simula as características de não-linearidade e assimetria de uma FAI, atuando nos regimes transitório e permanente, foi proposto. O ajuste foi realizado fazendo uso de uma equação algébrica que aproxima o fenômeno de histerese.

As curvas referentes à resistência em estudo possuem características específicas nas regiões próximas a $i = 0$ e que foram levadas em conta no ajuste.

O estudo considerou todos os tipos de superfícies e os resultados obtidos com o ajuste proposto apresentaram desempenho superior para quase todos os casos avaliados.

Ao final, constatou-se que o modelo proposto pode ser reutilizado, desde que se disponha do valor de alguns poucos parâmetros.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e à UFCG pela infraestrutura.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] J. C. Chen, B. T. Phung, D. M. Zhang, T. Blackburn and E. Ambikairajah, "Study on high impedance fault arcing current characteristics," Power Engineering Conference (AUPEC), 2013 Australasian Universities, IEEE, 2013, p. 1-6.
- [2] D. I. Jeerings and J. R. Linders, "Ground resistance-revisited," IEEE Trans. Power Delivery, v. 4, n. 2, pp. 949–956, April 1989.

- [3] W. C. Santos, "Uma revisão de modelos clássicos de falta de alta impedância para efeito de melhoramento" Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2011.
- [4] Garcia, J. C., Vega Garcia, V., & Kagan, N. (2014, December). Detection of high impedance faults in overhead multi grounded networks. In Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEE/IAS International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- [5] R. M. Nakagomi, "Proposição de um sistema de faltas de alta impedância em redes de distribuição," Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006.
- [6] R. H. Kaufmann and J. C. Page, "Arcing fault protection for low-voltage power distribution systems – nature of the problem," AIEE Transactions on Power Apparatus Systems, v. 79, December 1960.
- [7] D. T. W. Chan and X. Yibin, "A novel technique for high impedance fault identification," IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 3, July 1998.
- [8] S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang and T. H. Kim, "A modeling method of a high impedance fault a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP", in IEEE PES Summer Meeting 2001, v. 2, pp. 1175-1180.
- [9] Leuven EMTP Center. ATP – Alternative Transient Program – Rule Book. Hervelee, Belgium, 1987.
- [10] W. C. Santos, N. S. D. Brito and B. A. Souza, "High Impedance Fault Modeling Based on Statistical," in International Conference on Power Systems Transients, 2015.
- [11] L. A. L. Almeida; A. M. N. Lima; G.S. Deep e H. Neff, "Um modelo diferencial para histerese magnética: Representação algébrica recursiva," Revista Controle & Automação, v.14, Janeiro, Fevereiro e Março 2003.