

PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA TÉCNICA PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

HENRIQUE STEIN*, EDUARDO M. DOS SANTOS*, FABIANA C. LAGOAS*, JOÃO P. J. NETO*, GIOVANI M. ZUANAZZI*, JACQUELINE C. BATISTELLA*, MARCEL STALTER*

*UNIPAMPA

Av Tiarajú, 810, CEP: 97546-550
Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil

Emails: henriquestein.eletrica@gmail.com, eduardosantos@unipampa.edu.br,
fabiana.lagoas@gmail.com, plinio@unipampa.edu.br, giovanizuanazzi@hotmail.com,
jacquelinebatistella@gmail.com, marcelstalter@gmail.com

Abstract— The electricity distribution networks are predominantly aerial in our country. This feature makes the network becomes exposed to adverse conditions, caused by man or nature, which, depending on the situation, can cause the rupture of one or more conductors of the primary medium voltage network. When a feeder broken remains energized on the ground or any surface with high dielectric resistance, stays characterized a High Impedance Fault (HIF), where the amplitude of the resulting electric current of this type of fault has generally similar values to normal operation not promoting the actuation of protection devices. Thus, if the driver remains energized, it represents a risk for people and animals in the local, which is undesirable. In this context, we present a new technique for detecting high impedance faults, which seeks the feature of buildup present in the waveforms of current signals in this type of fault. This classification occurs after the performance of a transient detector. The methodology was implemented in Matlab® and tested for various current signals obtained from the simulation of a test system in EMTP-ATP software. In all cases analyzed, the proposed methodology was able to detect and correctly classify high impedance faults.

Keywords— Electric Arc, Classification, Detection, High Impedance Faults, Protection, Transitory.

Resumo— As redes de distribuição de energia elétrica são predominantemente aéreas em nosso país. Essa característica faz com que estas fiquem expostas à condições adversas, causadas pelo homem ou pela natureza, as quais, dependendo da situação, podem provocar o rompimento de um ou mais condutores da rede primária de média tensão. Quando um condutor rompido permanece energizado sobre o solo ou qualquer superfície com elevada rigidez dielétrica, caracteriza-se uma Falta de Alta Impedância (FAI), onde a amplitude da corrente elétrica resultante desse tipo de falta apresenta, geralmente, valores semelhantes aos normais de operação, não promovendo a atuação dos dispositivos de proteção. Dessa forma, o condutor permanece energizado, representando um risco para as pessoas e animais que possam circular no local, o que é indesejável. Nesse contexto, apresenta-se uma nova técnica para detecção de faltas de alta impedância, a qual busca a característica de *buildup* presente nas formas de onda dos sinais de corrente neste tipo de falta. Essa classificação ocorre após a atuação de um detector de transitórios. A metodologia foi implementada em Matlab® e testada para vários sinais de corrente obtidos a partir da simulação de um sistema teste no software EMTP-ATP®. Em todos os casos analisados, a metodologia proposta foi capaz de detectar e classificar corretamente as faltas de alta impedância.

Palavras-chave— Arco Elétrico, Classificação, Detecção, Falta de Alta Impedância, Proteção, Transitório.

1 Introdução

Uma Falta de Alta Impedância (FAI) acontece quando um condutor primário da rede de distribuição entra em contato com alguma superfície ou objeto que tenha por característica, como o nome sugere, uma elevada impedância. As correntes resultantes desse tipo de falta não são detectadas por equipamentos usuais de proteção, tais como as chaves fusíveis e os relés de sobrecorrente. Diferente de um curto-circuito, onde a corrente de falta atinge altos valores, uma FAI gera correntes na faixa de 0 a 50A (Wester, 1998). Dentro dessa faixa os valores se alteram de acordo com a tensão da rede e a superfície na qual o condutor fez contato, a qual pode ser, por exemplo, asfalto, areia seca, concreto, ou, até mesmo, a inclinação de uma árvore.

Atualmente, existe uma grande preocupação em relação as FAIs por parte das concessionárias de energia, pois a não atuação dos dispositivos de

proteção convencionais, no caso do rompimento de condutores, ocasiona elevados riscos de choque elétrico, além de poder causar focos de incêndio (Torres et al., 2011).

Como referido anteriormente, não é possível detectar uma FAI por sobrecorrente. No entanto, uma característica que torna possível sua detecção é a presença do arco elétrico. Voltando ao caso de um condutor caído, a combinação de uma tensão relativamente elevada e o contato com uma superfície sem aperto mecânico, ou seja, solto, permite um *gap* de ar entre o condutor e a superfície. A consequência disso é a formação de arcos elétricos nas áreas de contato com essa superfície (Vijayachandran, 2012).

Uma das características mais marcantes das formas de onda das correntes oriundas de uma FAI é a fase de *buildup*, a qual é causada pelo surgimento dos arcos elétricos. Essa fase, nada mais é do que um crescimento notável da amplitude da corrente de falta. Ainda, dentro da fase de *buil-*

dup, podem ocorrer os chamados *shoulders*, que são trechos aleatórios onde a amplitude da corrente se mantém constante durante alguns ciclos (Nakagomi, 2006). Na Fig. 1 é possível observar esses fenômenos. Tal imagem mostra uma oscilografia de um ensaio realizado pela CESP em 1985, na subestação de Conchas, quando um cabo foi lançado ao solo durante um ensaio.

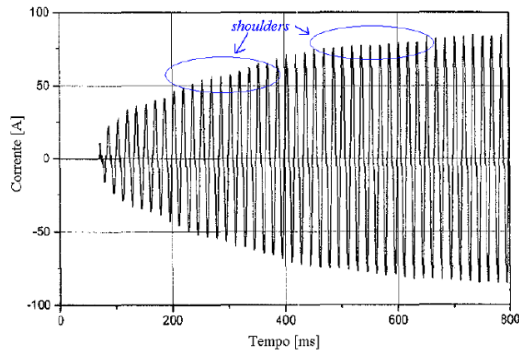


Figura 1: Fase de *buildup* e detalhes dos *shoulders*.
Fonte: NAKAGOMI, 2006.

Existem muitos métodos para detecção de FAIs que podem ser encontrados na literatura especializada, como os propostos por (de Arruda Penteadó Neto, 2005). Uma dessas propostas refere-se à implantação de sensores de corrente com comunicação via rádio que detectam a defasagem angular entre as correntes. Quando essa defasagem chegar próximo a 180° , entende-se que ocorreu uma FAI. Outra solução proposta por (de Arruda Penteadó Neto, 2005) é a utilização de extensômetros, os quais são sensores que variam sua resistência de acordo com a deformação física que experimentam. Tais sensores seriam instalados nos isoladores que sustentam os cabos. Quando um condutor rompe, ocorrem mudanças na tração mecânica dos isoladores que o sustentam, o que seria percebido pelos sensores.

Uma ferramenta matemática muito utilizada por pesquisadores na detecção de FAIs é a Transformada Wavelet (TW), a qual consegue trabalhar no domínio da frequência e do tempo simultaneamente. O método proposto por (Torres et al., 2011) utiliza uma derivação dessa ferramenta, a Transformada Wavelet Discreta, para extrair as componentes de alta frequência do sinal de corrente que o arco elétrico pode causar quando ocorre uma FAI. Outra técnica desenvolvida por (Michalik et al., 2006) utiliza o Coeficiente Wavelet Contínuo para monitorar a defasagem entre a tensão e a corrente de sequência zero nas fases do alimentador. Quando essa defasagem atinge um valor limite, uma FAI é detectada.

Este trabalho apresenta uma nova técnica para a classificação de FAIs, a qual rastreia a fase de *buildup* nos sinais de corrente, após a detecção de um transitório. Tal metodologia foi implemen-

tada em Matlab® e testada para diversos sinais de corrente obtidos durante a simulação de transitórios em um sistema teste, utilizando o software EMTP-ATP®. A metodologia proposta detectou e classificou corretamente as FAIs em todos os casos analisados.

2 Técnica Proposta para Detecção das FAIs

A metodologia proposta para detecção das FAIs é composta por duas etapas, sendo uma a fase de detecção do transitório e a outra, a fase de classificação da FAI. Ambas as etapas são descritas nas subseções seguintes.

2.1 Detecção de Transitórios

Para detectar transitórios no sinal de corrente, foi utilizada a técnica proposta por (dos Santos et al., 2013). Esta técnica tem por fundamento o monitoramento das distâncias euclidianas entre dois pontos consecutivos no plano formado pelas amostras do sinal de corrente e o respectivo valor da primeira-função diferença desse sinal. O cálculo da 1ª função-diferença do sinal de corrente i_a para a amostra N , se dá por (1).

$$del_1(n) = i_a(n) - i_a(n-1) \quad (1)$$

Assim, os valores de $del_1(n)$ e $i_a(n)$ são dispostos como pares ordenados num plano cartesiano formado por $del_1 \times i_a$. Nesse plano, o movimento dos pontos $P(n) = (del_1(n), i_a(n))$ desenvolve uma trajetória bem definida em torno da origem do referido plano durante a operação normal do sistema, como mostra a Fig.2.

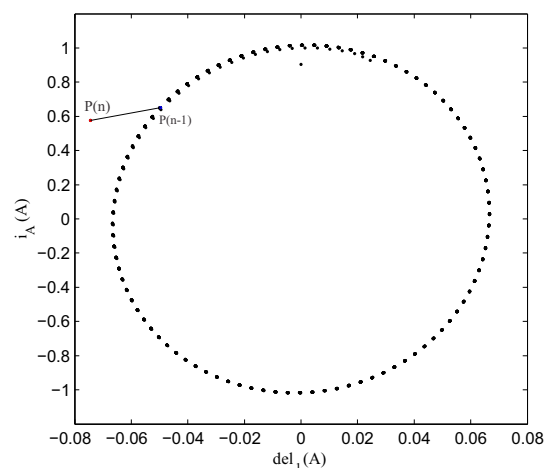


Figura 2: Plano formado por del_1 e i_a no momento em que ocorre o transitório.

Na operação normal do sistema, a distância entre dois pontos consecutivos é relativamente pequena. Quando acontece alguma perturbação no

sinal da corrente amostrada, ocorre um perceptível e instantâneo aumento nessa distância, o que também pode ser observado na Fig.2. Nessa imagem, a reta traçada entre $P(n-1)$ e $P(n)$, representa a distância entre o último ponto antes da ocorrência do transitório e o primeiro ponto após a incidência do mesmo (Stein, 2014).

Sendo assim, calculando a distância entre os pontos e monitorando se esta sofrerá um incremento significativo no seu valor frente uma janela de dados, é possível detectar um transitório no sinal de corrente. A distância entre os pontos, chamada $dist$, e o valor de ajuste para detecção de algum evento transitório, chamado de Th_{trans} , são calculados, como segue, respectivamente, em (2) e (3).

$$dist_1 = ((del_1(n) - del_1(n-1))^2 + (i_a(n) - i_a(n-1))^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$Th_{trans}(n) = \mu(janela_1(n)) + 1,2 \times \sigma(janela_1(n)) \quad (3)$$

O parâmetro μ representa uma média e σ o desvio padrão dentro de uma janela de dados, cujo o número de amostras é equivalente a um período da frequência da rede, ou seja N amostras. Nas simulações que serão mostradas nesse artigo, foram utilizadas taxas de amostragem iguais a 11.52 kHz, equivalentes a 192 amostras por ciclo, considerando a frequência da rede sendo 60 Hz. Vale ressaltar que essa janela de dados é atualizada a cada novo valor de $dist_1$. Assim, a cada nova amostra recebida, o valor mais antigo da janela é descartado. As equações (4) e (5) descrevem essa atualização, como exemplo, para um valor de $N=96$.

$$janela_1(n) = [dist_1(n-95) \quad dist_1(n-94) \quad \dots \quad dist_1(n)] \quad (4)$$

$$janela_1(n+1) = [dist_1(n-94) \quad dist_1(n-93) \quad \dots \quad dist_1(n) \quad dist_1(n+1)] \quad (5)$$

Sendo assim, quando a distância entre dois pontos se desviar do padrão da janela de dados, um transitório é detectado. A Fig.3 apresenta um exemplo de atuação do detector de transitório para uma evento ocorrido em 0,22 segundos.

2.2 Classificação de FAIs

Logo após a detecção de um transitório, começa o processo de classificação do mesmo como sendo uma FAI ou não. Mais precisamente, é verificado

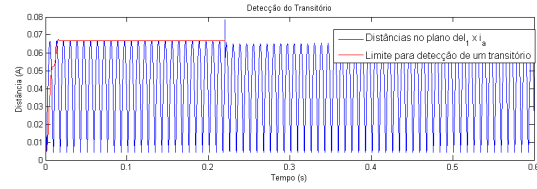


Figura 3: Exemplo de atuação do detector de transitório.

se, imediatamente depois de uma variação do sinal de corrente, esse sinal irá apresentar a fase de *buildup* em seu comportamento.

Em todo o sinal de corrente adquirido é retirado sua envoltória característica. Consegue-se isso pela obtenção do valor máximo presente em cada janela de dados, a qual contém N amostras do respectivo sinal de corrente, por definição i_a . O valor da envoltória é obtido por (6), onde a $janela_2(n)$ é atualizada de forma análoga ao ocorrido para a $janela_1(n)$.

$$env_1(n) = \max(janela_2(n)) \quad (6)$$

Depois, o sinal de env_1 é filtrado por um filtro de média numa janela contendo N valores de env_1 , conforme (7).

$$env_2(n) = \mu(janela_3(n)) \quad (7)$$

Após a eliminação do resíduo do filtro, o qual mantém o valor máximo do sinal de corrente medido durante a ocorrência do transitório por um ciclo do sinal de corrente, e o valor de env_2 estabilizar, fica registrado o valor de Th_{FAI} . Este é um valor limite, e, a partir desse registro, inicia-se o processo de identificação da fase de *buildup* do sinal de corrente. Portanto, uma falta de alta impedância será identificada quando as condições descritas em (8) e (9) forem satisfeitas por, no mínimo, dez ciclos do sinal de corrente.

$$env_1(n) > Th_{FAI} \quad (8)$$

$$env_2(n) > env_2(n-1) \quad (9)$$

Para uma melhor visualização da lógica desenvolvida, um fluxograma de todos os processos da técnica proposta é ilustrado na Fig.4.

3 Simulações e Resultados

Todas as simulações foram desenvolvidas no Software EMPT-ATP®. Os dados obtidos nas simulações foram exportados para o Software MATLAB®, onde foram processados no algoritmo que também foi elaborado neste ambiente.

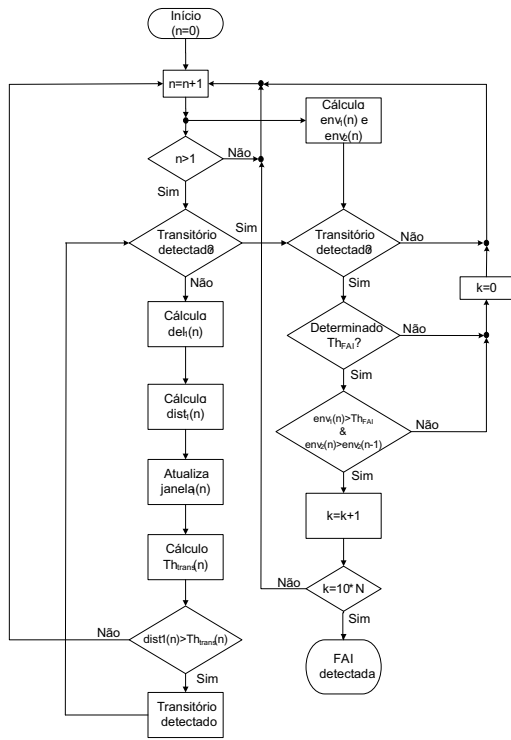


Figura 4: Fluxograma.

3.1 Sistema teste simulado

O sistema teste utilizado para simular e validar a técnica proposta é semelhante ao que é apresentado em (Farias, 2013). Tal sistema é composto por dois alimentadores troncais. Um deles possui cargas maiores e mais concentradas, de forma a representar uma rede urbana. O outro com cargas menores e mais dispersas, o que caracteriza um alimentador rural. A Fig.5 ilustra o diagrama unifilar com as características do sistema teste utilizado para as simulações.

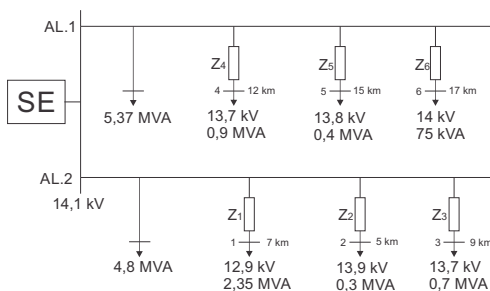


Figura 5: Sistema teste.

As impedâncias acumuladas nos trechos, até os pontos numerados no diagrama unifilar, foram consideradas iguais em cada fase e seus respectivos valores de sequência positiva são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de impedância acumulados por trecho.

Trecho	$R_A = R_B = R_C(\Omega)$	$X_A = X_B = X_C(\Omega)$
Z_1	1,66	7,34
Z_2	3,083	5,85
Z_3	2,33	9,08
Z_4	3,09	6,2
Z_5	9,25	8,46
Z_6	7,04	9,87

3.2 Modelo computacional para simulação de FAI

Para reproduzir as alterações que as FAIs provocam no sinal de corrente do sistema teste, foi adotado o modelo computacional proposto por (Nakagomi, 2006) e que pode ser visto na Fig.6. Este modelo é composto por duas resistências variáveis (HZR1 e HZR2) ligadas em série e que são controladas por TACS. A primeira produz distorções e assimetria no sinal da corrente, como pode ser observado na Fig.7. A segunda resistência faz com que a corrente cresça de tal modo que resulte na fase de *buildup*, o que é ilustrado na Fig.8. Essas alterações provocadas por essas duas resistências reproduzem as principais consequências que as faltas de alta impedância causam no sinal de corrente em casos reais.

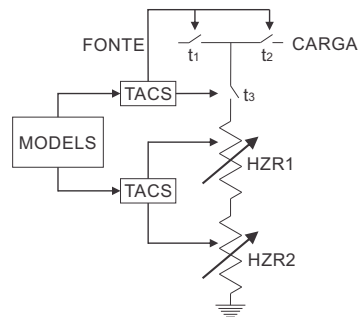


Figura 6: Modelo computacional para simulação de FAIs desenvolvido por (Nakagomi, 2006).

Esse modelo desenvolvido por (Nakagomi, 2006) ainda conta com três chaves controladas também por TACS. As chaves t_1 e t_2 podem ser ativadas de modo a escolher onde a falta acontecerá, se no lado da fonte ou da carga. A chave t_3 é responsável por simular o tempo estimado que o condutor demora até cair no solo quando acontece um rompimento. Esse tempo é de 1,2 segundos e não pode ser modificado pelo usuário.

3.3 Resultados

Dentre os casos testados durante o desenvolvimento deste método, apenas um será apresentado neste artigo. Outros casos e maior detalha-

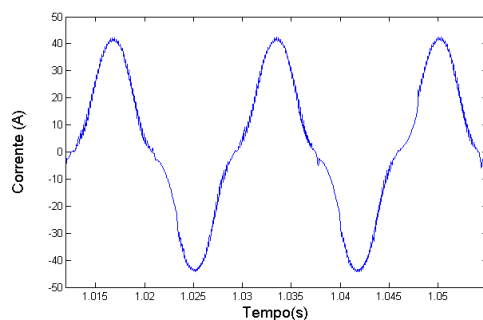


Figura 7: Detalhe das distorções características do sinal de corrente para uma FAI.

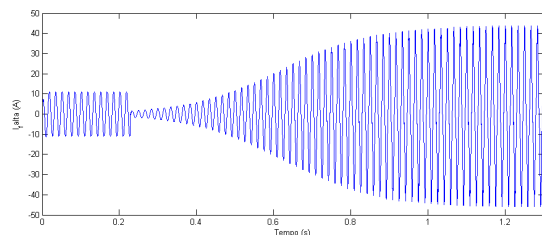


Figura 8: Forma de onda da corrente no ponto de ocorrência da falta de alta impedância.

mento da técnica proposta podem ser vistos em (Stein, 2014). Este caso simula uma FAI ocorrida no ponto 2 indicado na Fig.5 no instante 0,22 segundo. Nesse caso, valor da resistência da falta cresce até o valor de 250Ω .

A Fig.9 exibe o sinal da corrente do alimentador em condições nominais até o instante em que ocorre a FAI (0,22s). Neste momento percebe-se uma pequena queda na amplitude desse sinal, que se dá pelo rompimento de um condutor. Assim que o condutor atinge o solo, a corrente volta a crescer até o acomodamento do condutor, atingindo um valor próximo ao nominal.

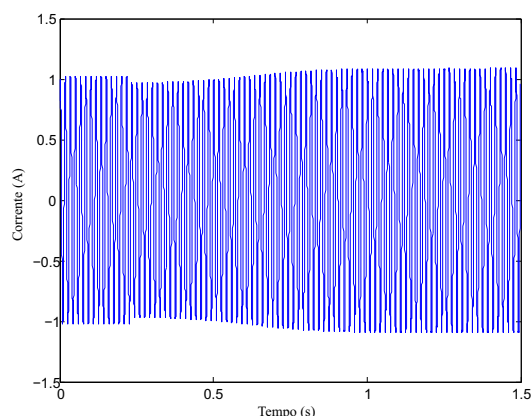


Figura 9: Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI.

A atuação do detector de transitório para este teste é apresentada na Fig.10. Em (a), pode-se observar o valor da distância entre os pontos no

plano $del_1(A) \times i_A$. O estado do detector é mostrado em (b). Quando a distância entre os pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ torna-se maior do que o valor limite, o detector de transitório muda do estado zero para um. Neste caso, o transitório foi detectado no instante correspondente à primeira amostra após a ocorrência da FAI.

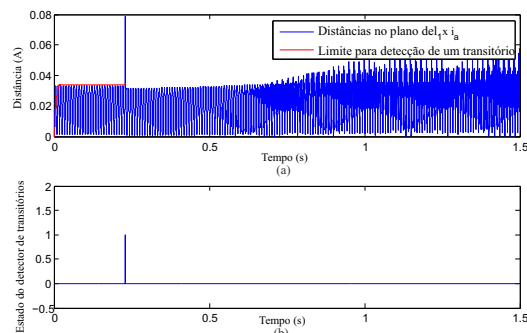


Figura 10: Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivos no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.

A disposição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ desde o início da simulação até o instante que ocorre a falta pode se visto na Fig.11. O ponto azul na figura destaca o último ponto antes da ocorrência da falta. Já o ponto vermelho refere-se exatamente ao instante em que o transitório da FAI é detectado. A reta formada entre esses dois pontos representa o incremento na distância, que, neste caso, é consideravelmente maior do que a distância entre pontos anteriores a FAI. Seguindo a observação dos pontos depois da ocorrência da FAI, na Fig.12, percebe-se que a trajetória dos pontos pretos antes da FAI é bem definida. Diferente dos pontos em vermelho depois da FAI, que ficam dispersos devido à distorção no sinal da corrente.

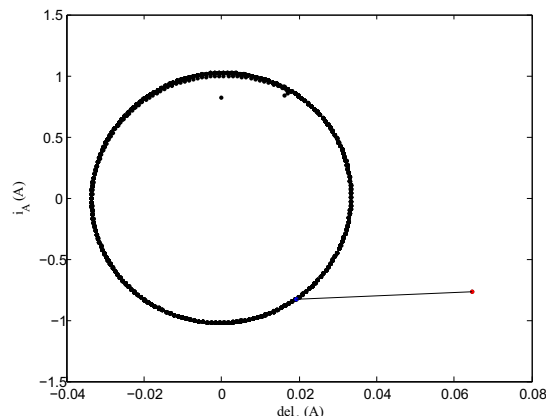


Figura 11: Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.

Após a detecção do transitório, o algoritmo faz a classificação do evento como sendo ou não uma FAI. Isso é feito pela análise do comporta-

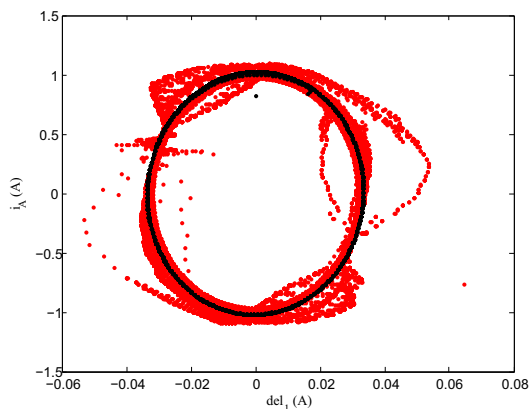


Figura 12: Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.

mento da corrente durante os ciclos seguintes à ocorrência do transitório. Se este sinal apresentar a fase de *buildup*, então a FAI é detectada. No gráfico da Fig.13, os pontos nas cores vermelho e preto, representam, respectivamente, quando ocorre a detecção do transitório e a classificação do evento, a qual é feita quando as condições descritas em (8) e (9) são simultaneamente satisfeitas por dez ciclos.

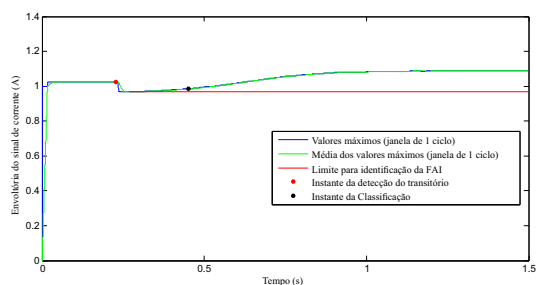


Figura 13: Atuação da metodologia para classificação da FAI.

4 Conclusão

Diante do fato de que a detecção das faltas de alta impedância é de grande importância, no sentido de evitar as tragédias que o rompimento de um condutor pode causar, todo o estudo em busca de uma solução praticável é extremamente relevante.

Outros métodos de detecção podem ser encontrados na literatura. Entretanto, a maioria depende de sensores implantados na estrutura da rede ou de equipamentos adicionais para processamento do sinal, o que torna impraticável aplicações em larga escala. A técnica proposta nesse trabalho é vantajosa nesse sentido, pois depende apenas da análise do sinal de corrente dos alimentadores, o que pode ser realizado dentro de uma subestação. Além disso, o método possui potencial para ser implantado em lógicas de relés digitais, o que facilitaria sua aplicação.

Por fim, a presente técnica foi testada para FAIs em todos os pontos do sistema teste, detectando e classificando corretamente em todos os casos analisados. Logo, espera-se que a metodologia proposta possa contribuir com a melhoria dos sistemas de proteção em situações que envolvam FAIs, tendo em vista a confiabilidade apresentada nas simulações realizadas.

Referências

- de Arruda Penteado Neto, R. (2005). *Sistemas para detecção de faltas de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica*, PhD thesis, Universidade Federal do Paraná.
- dos Santos, E., Cardoso, G., Farias, P. and de Moraes, A. (2013). Ct saturation detection based on the distance between consecutive points in the plans formed by the secondary current samples and their difference-functions, *Power Delivery, IEEE Transactions on* **28**(1): 29–37.
- Farias, P. E. (2013). Detecção e classificação de transitorios em redes de distribuição para identificação de faltas de alta impedância.
- Michalik, M., Rebizant, W., Lukowicz, M., Lee, S.-J. and Kang, S.-H. (2006). High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm, *Power Delivery, IEEE Transactions on* **21**(4): 1793–1802.
- Nakagomi, R. M. (2006). *Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição*, PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Stein, H. (2014). Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Faltas de Alta Impedância em Redes de Média Tensão. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brazil.
- Torres, G., Ruiz, P. et al. (2011). High impedance fault detection using discrete wavelet transform, *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 2011 IEEE, IEEE*, pp. 325–329.
- Vijayachandran, Gayathri e Mathew, B. (2012). High impedance arcing fault detection in mv networks using discrete wavelet transform and artificial neural networks, *Green Technologies (ICGT), 2012 International Conference on, IEEE*, pp. 089–098.
- Wester, C. G. (1998). High impedance fault detection on distribution systems, *Rural Electric Power Conference, 1998. Papers Presented at the 42nd Annual Conference, IEEE*, pp. c5–1.