

Henrique Stein

**Proposição de uma Nova Técnica para
Detecção de Falhas de Alta Impedância em
Redes de Média Tensão**

Alegrete, RS

Janeiro de 2015

Henrique Stein

Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Faltas de Alta Impedância em Redes de Média Tensão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete, RS

Janeiro de 2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S519p Stein, Henrique

Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Falhas de
Alta impedância em Redes de Média Tensão / Henrique Stein.
60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Sistema Elétrico de Potência. 2. Proteção de Sistemas
Elétricos de Potência. 3. Falhas de Alta Impedância. I.
Título.

Autoria: Henrique Stein

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Instituição	Assinatura
1	Eduardo Machado dos Santos	Prof. Me.	unipampa	<i>Eduardo M. dos Santos</i>
2	Luiz Antonio Maccari Junior	Prof. Me.	unipampa	<i>Luiz Antonio Maccari Junior</i>
3	Marcelo Hahn Durgante	Prof. Me.	unipampa	<i>Marcelo Durgante</i>

Data da aprovação: 16 de Janeiro de 2015.

Dedico este trabalho à minha família, amigos e pessoas próximas pelo apoio durante a graduação e desenvolvimento deste trabalho.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à Deus por me proporcionar uma vida saudável, força e sabedoria. Também, por me presentear com uma família maravilhosa.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Clarisse e Almiro, pelo incentivo e apoio, e também, pelo suporte financeiro para que eu pudesse estudar sem ter outras preocupações.

Ao meu orientador e amigo Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos por compartilhar os seus conhecimentos, pela força, incentivo, dedicação e paciência. O seu acompanhamento foi fundamental para que este trabalho fosse realizado.

“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso”.
(Albert Einstein)

Resumo

Os sistemas de distribuição de energia elétrica, principalmente os aéreos, estão sujeitos a ação do tempo, das pessoas e dos fenômenos naturais. Essas ações podem causar a interrupção do fornecimento de energia pela atuação do sistema de proteção, seja por acidente, por descargas atmosféricas, por defeitos em equipamentos, entre outros. As proteções convencionais atuam sempre que detectam uma sobrecorrente no sistema, a qual pode ser causada por um curto-circuito, por fuga de corrente em isoladores ou por excesso de carga. Porém existe uma situação em que esses dispositivos não atuam. Isso ocorre quando um condutor da rede primária se rompe e entra em contato com alguma superfície que apresente uma resistência elétrica elevada. Esse evento é denominado Falta de Alta Impedância (FAI). Nessas condições, a corrente de falta resultante, dependendo do terreno, pode alcançar valores próximos aos nominais, fazendo com o que os dispositivos de proteção não atuem. Esse problema é de muita importância, já que o condutor caído se mantém energizado, colocando em risco a vida de pessoas e animais que venham a passar no local. Diante disso, muitos estudos vêm sendo feitos para desenvolver metodologias capazes de detectar as FAIs. Entretanto, ainda não existe nenhum método robusto o suficiente que seja capaz de detectar faltas de alta impedância em todas as condições operacionais possíveis. Além disso, a maior parte das metodologias existentes são economicamente inviáveis para implantação em larga escala. Sendo assim, este trabalho propõe uma nova técnica para detecção FAIs que utiliza apenas os valores de corrente amostrados na subestação de energia. Essa técnica conta com um detector de transitório e é capaz de classificar uma FAI através da característica de *buildup* da corrente, a qual é própria desse tipo de falta. A detecção de um transitório é feita com base no cálculo das distâncias euclidianas entre dois pontos no plano formado pelas amostras do sinal de corrente e o respectivo valor da primeira função-diferença desse sinal. Uma vez que esse parâmetro sofre um incremento considerável quando da ocorrência de um distúrbio na rede, um evento ou transitório fica caracterizado sempre que o valor das referidas distâncias torna-se maior do que um valor limite, dado segundo funções estatísticas calculadas para uma janela de dados contendo valores passados deste parâmetro. Determinada a ocorrência de um transitório na rede, inicia-se o processo de classificação de faltas de alta impedância. Neste processo é identificada a característica de *buildup* do sinal de corrente, a qual permanece por alguns ciclos do sinal. O algoritmo proposto foi testado com base em simulações realizadas no *EMTP/ATP* para obtenção dos sinais de corrente, utilizando modelos computacionais de simulação de FAIs encontrados na literatura. Já o algoritmo foi implementado no ambiente MATLAB[®]. Os resultados obtidos demonstram que a técnica proposta é robusta e eficaz para detecção de FAIs, uma vez que esta classificou corretamente a ocorrência de faltas de alta impedância em todos os casos analisados.

Palavras-chave: Arco Elétrico, Faltas de Alta Impedância, Proteção, Redes de Distribuição, Sistema Elétrico de Potência, Transitórios.

Abstract

Power distribution systems are subject to the action of time, people and natural phenomena. These actions can cause the interruption of power supply by the action of the protection system, whether by accident, lightning, by defects in the equipment, among other factors. Conventional protections operate whenever the system detects an overcurrent which may be caused by a short circuit, by current leakage in the insulating or overloaded system. But there is a situation in which these devices do not work. This occurs when a feeder of the primary network breaks down and comes in contact with any surface that has high electrical resistance. This event is called High Impedance Fault (HIF). Under these conditions, the resulting fault current, depending on the terrain, can reach values close to the nominal ones, causing the non action of protection devices. This problem is of great importance, since the fallen feeder remains energized, endangering the lives of people and animals that may go on the local where the conductor remains fallen. Therefore, many studies have been made to develop methodologies that can detect the HIFs. However, no enough robust method exists that is capable of detecting high impedance faults in all possible operating conditions. Furthermore, most existing methods are not economically viable for large scale implementation. Therefore, this paper proposes a new technique for detecting HIFs using only the values of current sampled at the power substation. This technique has a transient detector and is able to classify a HIF through the feature of buildup of the current waveform, which is characteristic of this type of fault. The detection of a transient is made according to the calculation of the Euclidean distance between two consecutive points in the plan formed by the current signal samples and their respective values of the first-difference function. Since this parameter undergoes a considerable increase when a disturbance on the network occurs, an event or transient is characterized whenever the value of those distances becomes greater than a threshold value, according to the statistics functions calculated for a data window containing past values of distances. After the occurrence of a transient in the network is verified, it begins the process of high impedance fault classification. An HIF is classified by checking the feature of buildup in the current signal, which remains for a few signal cycles. The proposed algorithm was tested for signals obtained by simulations in the EMTP/ATP, using computer models of HIFs simulation proposed in the literature. The algorithm was implemented in MATLAB[®]. The results show that the proposed technique is robust and effective for the detection of HIFs, since it correctly classified the occurrence of high impedance faults in all cases analyzed.

Keywords: Distribution Networks, Electric Arc, Electric Power System, High Impedance Faults, Protection, Transients.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo de resistências variável controlada por TACS.	17
Figura 2 – Modelo de arco Emanuel.	18
Figura 3 – Característica de um transitório oscilatório.	22
Figura 4 – Forma de onda da corrente típica de uma FAI (FARIAS, 2013).	24
Figura 5 – Fase de <i>buildup</i> e detalhes dos <i>shoulders</i> (NAKAGOMI, 2006)	25
Figura 6 – Decomposições da TWD na fase em falta do alimentador (TORRES et al., 2011).	28
Figura 7 – Decomposição D3 de todas as fases do alimentador (TORRES et al., 2011).	29
Figura 8 – Somatório do valor absoluto da decomposição D3 para todas as fases do alimentador (TORRES et al., 2011).	29
Figura 9 – Defasagem entre os CWCs da tensão e corrente de sequência zero da fase em falta e de uma fase em condições normais (MICHALIK et al., 2006).	30
Figura 10 – Sensor de corrente com comunicação via rádio (NETO, 2005).	31
Figura 11 – Isolador de ancoragem com o extensômetro (NETO, 2005).	31
Figura 12 – Plano formado por del_1 e i_a antes da ocorrência do transitório.	34
Figura 13 – Plano formado por del_1 e i_a no momento em que ocorre o transitório.	34
Figura 14 – Exemplo do detector de transitório.	35
Figura 15 – Fluxograma.	37
Figura 16 – Sistema teste utilizado para validar o algoritmo.	39
Figura 17 – Modelo computacional para simulação de FAIs desenvolvido por Nakagomi (2006).	40
Figura 18 – Característica $V \times I$ para falta de alta impedância (NAKAGOMI, 2006).	41
Figura 19 – Curva $V \times I$ de da falta de alta impedância com valores em p.u. (NAKAGOMI, 2006).	42
Figura 20 – Forma de onda da corrente no ponto de ocorrência da falta de alta impedância.	43
Figura 21 – Detalhe das distorções características do sinal de corrente para uma FAI.	43
Figura 22 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 1.	44
Figura 23 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	45
Figura 24 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.	46
Figura 25 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.	46

Figura 26 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.	47
Figura 27 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 2.	48
Figura 28 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	48
Figura 29 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.	49
Figura 30 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.	49
Figura 31 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.	50
Figura 32 – Forma de onda da corrente resultante da entrada de carga para o Caso 3.	51
Figura 33 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	51
Figura 34 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.	52
Figura 35 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.	52
Figura 36 – Corrente resultante no segundo alimentador devido à saída da carga do ponto 4 do sistema teste.	53
Figura 37 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores típicos de corrente de faltas de alta impedância (AUCOIN; JONES, 1996).	23
Tabela 2 – Valores de impedância acumulados por trecho.	39
Tabela 3 – Resultados obtidos.	59

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações Gerais	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Motivação	15
1.4	Estado-da-Arte	16
1.4.1	Sistemas e modelos para simulação do arco elétrico	16
1.4.2	Classificação de faltas de alta impedância	18
1.5	Estrutura do Trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Considerações Gerais	21
2.2	Transitórios em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	21
2.3	Faltas de Alta Impedância	22
2.4	Dispositivos de Proteção em Redes Aéreas de distribuição	26
2.4.1	Chaves-fusíveis	26
2.4.2	Religador Automático	26
2.4.3	Seccionador Automático	27
2.4.4	Relés com Disjuntores	27
2.5	Métodos Existentes de detecção de FAIs	27
2.6	Considerações Finais	31
3	TÉCNICA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FAIS	33
3.1	Considerações Gerais	33
3.2	Detecção de Transitórios	33
3.3	Classificação de FAIs	36
3.4	Considerações Finais	36
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	38
4.1	Considerações Gerais	38
4.2	Sistema Teste	38
4.3	Modelo Computacional Utilizado para Simulação da FAI	39
4.3.1	Controle da Resistência HZR1	40
4.3.2	Controle da Resistência HZR2	41
4.4	Resultados	42
4.5	Caso 1 - FAI no Ponto 2 do Sistema Teste	44
4.6	Caso 2 - FAI no Ponto 6 do Sistema Teste	45

4.7	Caso 3 - Entrada de Carga no Segundo Alimentador	50
4.8	Caso 4 - Saída de Carga no Segundo Alimentador	50
4.9	Considerações Finais	52
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .	54
5.1	Conclusões	54
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	55
	Referências	56
	APÊNDICES	58
	APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS	59

1 Introdução

1.1 Considerações Gerais

As redes de distribuição de energia elétrica, principalmente as aéreas, estão constantemente expostas às condições inesperadas. Por estarem situadas nas cidades, onde há mudanças de cenários e atividades, ou em zonas rurais, onde pode haver a movimentação de máquinas agrícolas, as linhas de distribuição ficam sujeitas a acidentes físicos. Outras condições inesperadas seriam os fenômenos naturais, como as tempestades, as descargas atmosféricas e até mesmo a corrosão dos materiais, já que estes ficam expostos ao tempo. Todos esses fatores podem causar situações de curto-circuito, provocando a atuação dos dispositivos de proteção e, conseqüentemente, a interrupção no fornecimento de energia, pela abertura de ramais ou pelo disparo do disjuntor da subestação. No entanto, existe uma situação em que a proteção desses sistemas não é sensibilizada. Isso ocorre quando um condutor da rede primária se rompe e cai sobre terrenos que apresentam elevada resistência elétrica, o que resulta em uma corrente de falta relativamente baixa, semelhante a uma condição normal de carga, na qual os dispositivos de proteção não atuam, mantendo esse condutor energizado. Tal evento é chamado falta de alta impedância (FAI).

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral, uma abordagem sobre faltas de alta impedância, relatando suas causas, características e conseqüências, além de apresentar alguns métodos existentes para classificação desse tipo de falta. O objetivo principal é a proposição de uma nova técnica, que seja robusta e de fácil implementação em sistemas de proteção para detecção de FAIs.

1.3 Motivação

A principal característica das FAIs é uma amplitude de corrente relativamente baixa se comparada à outros tipos de falta, sendo estes valores abaixo ou próximo dos nominais do sistema. Dessa forma, os dispositivos de proteção convencionais não atuam e o condutor rompido se mantém energizado no solo. Esse tipo de situação é muito preocupante, pois coloca em risco a vida de pessoas e animais que possam vir a transitar no local onde se encontra esse condutor. Além disso, dependendo das condições e do tipo de terreno, o mesmo pode provocar incêndios.

Nesse contexto, ressalta-se que as concessionárias responsáveis pela rede de distribuição local só tomam conhecimento da situação mediante informação de terceiros. Isso acarreta na demora da correção do problema, prejudicando assim a continuidade do fornecimento de energia elétrica na região afetada pela queda do condutor.

Embora exista uma grande diversidade de técnicas para classificação de FAIs, ainda não se conhece um método que seja totalmente eficaz e ao mesmo tempo com custos de instalação viáveis para ser implantado e comercializado em grande escala. Diante disso, faz-se necessária a elaboração de novas técnicas que contribuam para a proteção do sistema de distribuição contra esse tipo de evento.

1.4 Estado-da-Arte

Nas duas últimas décadas, muitos trabalhos têm sido realizados na área de proteção de sistemas de distribuição. No que diz respeito à faltas de alta impedância, não é diferente. Existem diversas publicações sobre métodos de classificação e simulação de FAIs, conforme apresentado nas próximas Seções.

1.4.1 Sistemas e modelos para simulação do arco elétrico

Kizilcay e Seta (2005) propuseram a simulação digital do arco elétrico em uma rede de distribuição de média tensão de 10-kV, a qual utilizava uma bobina (Peterson Coil) conectada ao neutro da rede para compensação da corrente de falta capacitiva entre a rede e a terra. Segundo os autores, se essa bobina for bem ajustada, é possível extinguir o arco elétrico. Sendo assim, para realizar o ajuste do valor dessa bobina em simulações, faz-se necessário uma representação fiel das características dinâmicas desse arco.

Para isso, foi utilizada uma modelagem matemática feita por Darwish e Elkalashy (2005), na qual o arco é descrito por uma equação diferencial de primeira ordem, dada por (1.1), onde τ é uma constante de tempo, G é a condutância estacionária e g é a condutância variável. O arco foi representado por um bloco criado através da função MODELS no software *ATP/EMTP*. Para validar o modelo de arco, dados e gráficos gerados em simulações foram comparados à dados obtidos experimentalmente em laboratórios. Os resultados mostraram-se satisfatórios.

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G - g) \quad (1.1)$$

Além disso, um modelo de representação da instabilidade do arco que possui duas resistências variáveis controladas por TACS, foi usado no trabalho de Nakagomi (2006). Nesse modelo, a simulação do arco elétrico é feita por meio de um gerador de sinais randômicos utilizando a função MODELS do *ATP/EMTP*. Os valores da tensão e do

período de extinção e reignição do arco são escolhidos de forma estocástica entre valores pré-definidos. Esse modelo pode ser visto na Fig.1. Também, foram realizados ensaios de campo, onde um condutor de um alimentador real foi levado ao solo. Durante o ensaio, foi possível observar o fenômeno arco elétrico e realizar medições de tensão e corrente. Nas simulações, foi levado em conta o tempo em que o condutor leva para cair ao solo. Os resultados de simulação se mostraram bastante similares aos obtidos em campo.

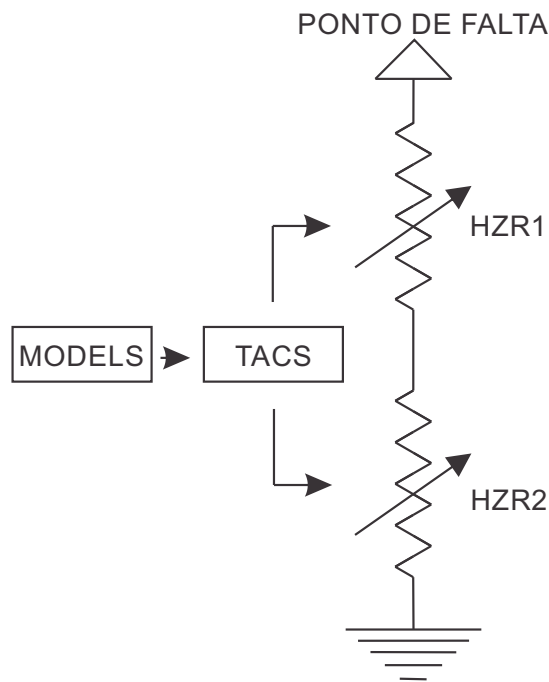


Figura 1 – Modelo de resistências variável controlada por TACS.

No trabalho de Elkalashy et al. (2007), uma falta de alta impedância ocorrida devido à inclinação de uma árvore sobre uma rede de média tensão, foi modelada e verificada experimentalmente. A modelagem foi baseada em equações térmicas, utilizando o modelo de arco universal visto em Darwish e Elkalashy (2005). O experimento foi realizado em laboratório a partir da energização do enrolamento secundário de um transformador com relação de tensão 13800/380V. O lado de alta tensão foi conectado a um barramento, no qual os galhos de uma árvore com o tronco aterrado foram encostados. Com isso, foi possível gerar um arco entre o barramento e o ponto de contato. Para este ensaio, foram feitas medições de tensão e corrente no ponto em falta, além da medição da resistência da árvore, que, naquelas condições, resultou em aproximadamente $200k\Omega$. Com os dados adquiridos, observaram-se as características de assimetria da corrente, bem como o conteúdo harmônico. As equações das simulações foram ajustadas através da comparação entre os gráficos de tensão e corrente para as simulações computacionais e para os dados experimentais. Ainda, foi utilizada a Transformada Wavelet para processar o sinal de corrente no barramento, para obtenção dos sinais de detalhe, a fim de se verificar o conteúdo harmônico envolvido.

Com base no modelo universal do arco, Shebl et al. (2010) também sugeriu uma combinação entre MODELS e TACS em *ATP/EMTP* para a simulação do arco elétrico. Além das resistências variáveis, foi adicionado ao modelo universal uma resistência fixa, a qual representa a impedância de uma árvore inclinada sobre um condutor da rede de distribuição. Para validar o modelo, os resultados foram comparados à outros modelos publicados. Após a validação, este modelo foi inserido no sistema teste IEEE 13 barras, no intuito de extrair as características de corrente no alimentador.

Por fim, um novo modelo para representação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição foi proposto por Sedighi (2014). Essa representação fundamenta-se no modelo de arco Emanuel, que possui diodos e fontes de corrente contínuas ligados em anti-paralelo, o qual pode ser visto na Fig.2. Essa proposta foi simulada em *ATP/EMTP* e consiste em diversos modelos Emanuel ligados em paralelo, separados por chaves estatísticas. Com isso, foi possível obter as características de assimetria da corrente, bem como a variação da amplitude da forma de onda da corrente. Também foram adquiridos dados de um alimentador real de $20kV$ e $8km$ de extensão, onde foram realizados ensaios de FAIs em diversos tipos de terreno, tais como asfalto, areia e concreto. Esses dados foram utilizados para validar o modelo de simulação a partir da comparação das distorções nas formas de onda da corrente. Ao final, foi aplicada a Transformada Rápida de Fourier para se extrair as componentes dos sinais obtidos.

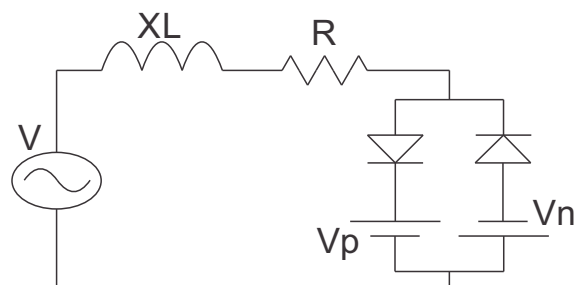


Figura 2 – Modelo de arco Emanuel.

1.4.2 Classificação de faltas de alta impedância

As principais referências encontradas que tratam da classificação de faltas de alta impedância, utilizam a Transformada Wavelet Discreta (TWD) para extrair características dos sinais e Redes Neurais Artificiais para classificação de eventos com base nessas características.

Segundo Oliveira et al. (2002) a Transformada Wavelet consiste na decomposição de um sinal em um conjunto de funções bases, sendo estas derivadas de uma única wavelet protótipo (wavelet-mãe) por sucessivos escalonamentos (dilatações e compressões) e translações (deslocamento no tempo). Além disso, a TWD é uma ferramenta matemática

de grande robustez na análise de sinais, e tem demonstrado superioridade em relação à Transformada de Fourier.

De acordo com Brumatti (2005) as Redes Neurais Artificiais (RNA's) são dispositivos não-lineares, inspirados na funcionalidade dos neurônios biológicos, aplicados no reconhecimento de padrões, na otimização e na previsão de sistemas complexos. São compostas por diversas unidades computacionais paralelas, interconectadas parcial ou totalmente. Cada uma dessas unidades, chamadas de neurônios artificiais, efetua um certo número de operações simples e transmite seus resultados aos neurônios vizinhos com os quais possui conexão. As RNA's podem ser treinadas para serem capazes de reconhecer padrões de acordo com a entrada recebida.

Com base nessas técnicas, Michalik et al. (2006) propuseram um novo algoritmo para detecção do arco elétrico em redes de distribuição. Esse algoritmo analisa a defasagem entre os coeficientes wavelet da tensão e da corrente de sequência zero. Após essa análise, uma RNA decide entre disparar um alarme, enviar um sinal para abertura do disjuntor da subestação ou manter o estado de operação normal. Para validar o algoritmo, foi gerado em *ATP/EMTP* um modelo de rede de distribuição, no qual foram simuladas faltas de alta impedância em diversos pontos da rede.

Além disso, Torres et al. (2011) propuseram em seu trabalho uma técnica de detecção FAIs que utiliza a Transformada Wavelet Discreta para análises das características dos sinais de corrente. Também, foram feitas simulações em *ATP/EMTP*, com o diferencial de que, ao invés de modelos computacionais, foram usados dados obtidos em campo. Nessa proposta, a FAI é detectada pela amplitude do somatório dos módulos dos coeficientes wavelet.

De forma análoga, observando o valor do somatório dos coeficientes wavelet em valor absoluto, Eldin et al. (2013) propuseram um algoritmo para detecção de FAIs. No entanto, as simulações foram realizadas em *MATLAB/Simulink*, utilizando o modelo de arco de resistência variável. O sistema teste era composto por vários alimentadores e algoritmos foram criados para identificar em qual alimentador e em qual das fases a FAI estava acontecendo.

Também utilizando TWD e *MATLAB/Simulink*, Vijayachandran e Mathew (2012) elaboraram um algoritmo para classificação desse tipo de evento. Nessa proposta, a simulação visa a inclinação de uma árvore sobre a rede de média tensão e a classificação dos transitórios é feita por uma RNA.

Finalmente, o trabalho de Farias (2013) apresenta métodos para detecção e classificação de transitórios, classificando também faltas de alta impedância. Os algoritmos elaborados utilizam ferramentas como Transformada Wavelet Discreta e Phase-Locked Loop (PLL) para detecção de transitórios. Além disso, a proposta do autor conta com uma

rede neural do tipo GRNN (Generalized Regression Neural Network) para a classificação de transitórios.

1.5 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 é descrita a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento desse trabalho. Nesse Capítulo, é feita uma abordagem sobre transitórios em sistemas de distribuição, incluindo faltas de alta impedância, além da apresentação de noções básicas a respeito das proteções convencionais utilizadas nesses sistemas. Também são apresentadas algumas das técnicas existentes para detecção e classificação de FAIs.

Além disso, a metodologia proposta para detecção e reconhecimento de FAIs é apresentada no Capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta o sistema teste desenvolvido, os casos que foram simulados e os resultados apresentados pela técnica proposta, bem como a análise desses resultados .

Finalmente, no capítulo 5, são feitas as conclusões e as sugestões para os trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Considerações Gerais

Um falta é caracterizada como um fenômeno accidental que impede o correto funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico. Como os padrões de qualidade de energia e continuidade do serviço estão sendo cada vez mais cobrado às concessionárias, se faz necessário um investimento cada vez maior no que diz respeito à proteção desses sistemas. Nos últimos anos, muitos estudos e estratégia estão sendo realizados, seja para garantir a continuidade do serviço pela eliminação de faltas temporárias, ou pela manutenção dos equipamentos através da extinção dos curtos-circuitos de forma rápida. No entanto, existe um tipo de falta que ainda não se tem uma solução prática, que é a falta de alta impedância. Essas, por sua vez, não causam sobrecorrente e são muito difíceis de ser detectadas pelo relé de neutro, pois, o grande número de ramais monofásicos existentes, leva o ajuste desses equipamento próximo aos 30% da corrente de carga máxima.

Neste capítulo, será abordados os temas que servem como base para o entendimento desse trabalho. Na primeira seção é feita uma introdução sobre os tipos de transitórios que mais ocorrem em sistemas de distribuição. A segunda seção traz um detalhamento sobre FAIs, como são causados, quais são as características e porque são difíceis de serem detectadas. Na terceira seção é dado, de forma resumida, os principais equipamentos de proteção de sistemas aéreos de distribuição e seus princípios de funcionamento. Por fim, a quarta seção trata de alguns métodos possíveis de detecção encontrados na literatura.

2.2 Transitórios em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Os sistemas de distribuição estão sujeitos a sofrer diversos fenômenos eletromagnéticos como: transitórios, variação de curta e longa duração, desequilíbrio de tensão, distorção da forma de onda, flutuação de tensão e variação de frequência. Os transitórios podem ser divididos em duas partes, transitório impulsivo e transitório oscilatório. O primeiro acontece na ocorrência de uma ou mais descargas atmosféricas. É de curta duração e se dá de forma unidirecional (negativa ou positivamente). Provoca sobretensões e, dependendo do caso, pode causar atuação dos dispositivos de proteção. No transitório oscilatório, a variação ocorre nos dois sentidos (positivo e negativo), o qual é exemplificado na Fig.3. Este, é gerado por eventos comuns do sistema, tais como, energização de linhas, saída de cargas indutivas, chaveamento de bancos de capacitor, energização de transformadores ferromagnéticos e até mesmo eliminação de faltas (MARTINHO, 2009).

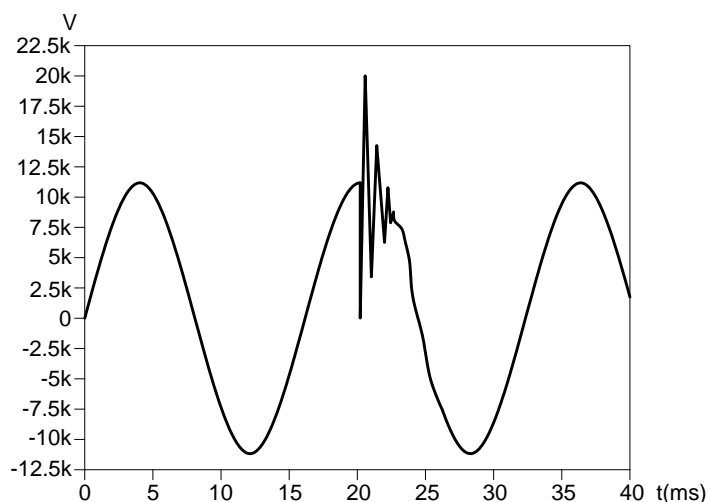


Figura 3 – Característica de um transiente oscilatório.

A energização de transformadores ou bancos de capacitores, que é considerada um transiente oscilatório, se ocorrer com valores abaixo de 5 kHz e tempo de duração entre 0,3 e 50 ms, é denominado transiente oscilatório de baixa frequência, que é encontrado nos sistemas de distribuição das concessionárias. O transiente oscilatório de média frequência ocorre entre 5 e 500 kHz em alguns microssegundos e pode ser causado por chaveamento de dispositivos de proteção, como, por exemplo, abertura de disjuntores de subestações. O transiente oscilatório de alta frequência, que ocorre acima de 500 kHz, é causado por descargas atmosféricas, chaveamento de cargas indutivas, entre outros (MARTINHO, 2009).

2.3 Falhas de Alta Impedância

Uma falta de alta impedância acontece quando um condutor do circuito primário de uma rede aérea de distribuição de média tensão se rompe e entra em contato com uma superfície que apresenta uma alta resistência elétrica. Esse fenômeno também pode ser causado, por exemplo, pela inclinação de uma árvore sobre a rede primária. Embora somente sejam registradas as faltas em que há o rompimento de um elo fusível, de acordo com Wester (1998), acredita-se que as FAIs possam ocupar de 5 a 20% do total de faltas que ocorrem nos sistemas de distribuição.

A principal característica desse tipo de falta é uma corrente elétrica resultante relativamente baixa. É difícil estipular valores de corrente para cada trecho de uma alimentador, já que, não depende de parâmetros da linha, e sim, da resistência característica do terreno de onde esse condutor venha a cair. Ainda, as condições climáticas podem afetar de forma considerável na corrente resultante desse tipo de falta. Segundo (FARIAS, 2013), os alimentadores que possuem classe de tensão de 15 kV são mais vulneráveis à ocorrência

de FAIs do que os alimentadores da classe de 25 kV ou mais, porém, embora pequenas, há chance de ocorrência da FAIs nesses alimentadores. A tabela 1 contém informações sobre valores típicos de corrente de falta conforme a composição do terreno.

Tabela 1 – Valores típicos de corrente de faltas de alta impedância (AUCOIN; JONES, 1996).

Superfície	Corrente(A)
Asfalto Seco ou Areia	0
Areia Molhada	15
Relva Seca	20
Gramma Seca	25
Relva Molhada	40
Gramma Molhada	50
Concreto Reforçado	75

Essa característica de baixa amplitude de corrente é o que torna as FAIs um tipo de falta difícil de ser detectada e eliminada. Como as correntes apresentam valores próximos ou abaixo da corrente nominal de carga dos alimentadores, os dispositivos de proteção convencionais, como relés de sobrecorrente ou elos fusíveis, que são projetados para atuar em situações em que a corrente é superior à nominal, acabam por não serem sensibilizados. Em decorrência disso, o condutor que sofreu o rompimento, se mantém energizado até que a concessionária seja informada por terceiros, sobre a situação ocorrida, e envie uma equipe até o local. Esse tipo de situação é de extrema importância, pois, enquanto o condutor permanece energizado ao solo, está oferecendo riscos à vida de pessoas e animais que possam vir a trafegar no local. Ainda, conforme o terreno e as condições locais, o faiscamento, gerado pelo contato do condutor com o solo, pode causar incêndio, gerando danos ao proprietário do terreno e para a concessionária.

Uma vez que a amplitude de corrente das FAIs são iguais ou menores que a corrente de carga do alimentador, impossibilitando sua detecção por sobrecorrente, se fez necessário estudos do comportamento desse tipo de falta. Ao longo dos anos, diversas pesquisas foram feitas nesse sentido. Diante disso, vale ressaltar as principais características desse evento, para que os detalhes possam ser útil na sua detecção. Uma importante característica, é a presença do arco elétrico. Isso ocorre porque o contato do condutor com o solo não é firme, ou seja, existe uma pequena camada de ar entre ele, e, como a diferença de potencial é alta em comparação com a isolação dessa camada de ar, o campo elétrico gerado vence esse dielétrico e acaba produzindo o arco elétrico. No entanto, isso não acontece imediatamente, antes da condução estável do arco, acontecem centelhamentos, que nada mais é do que a ignição e extinção do arco acontecendo rapidamente (NAKAGOMI, 2006).

Estudos realizados em laboratório permitiram verificar o comportamento da tensão e corrente, bem como, as correntes harmônicas, resultantes do arco elétrico num solo arenoso. O que foi observado é que a corrente gerada era assimétrica, sendo o semi-ciclo positivo maior do que o semi-ciclo negativo. Esse comportamento prevaleceu, tanto para pequenas, quanto para grandes amplitudes de corrente. Entretanto, os valores de amplitude dos semi-ciclos, variam constantemente de acordo com o tipo, temperatura e umidade do solo. Também observou-se que, à medida que o arco penetrava no solo, a umidade do solo em torno do arco diminuía, o que ocasionava a extinção do mesmo. Logo, a umidade do solo entrava em equilíbrio novamente, o que trazia a reignição do arco (EMANUEL et al., 1990). A Fig.4 mostra a assimetria e as distorções ocorridas na forma de onda da corrente em uma FAI.

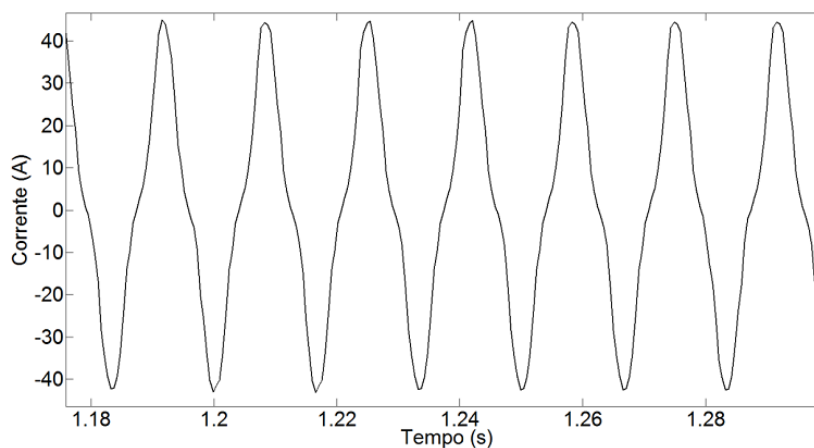


Figura 4 – Forma de onda da corrente típica de uma FAI (FARIAS, 2013).

Se o condutor possuir vários pontos de contato com o solo, o arco pode se formar em pontos que até então não conduziam, devido à variação da distribuição do campo elétrico no solo. Conclui-se então, que a corrente gerado num arco é distorcida, assimétrica, aleatoriamente interrompida e progressivamente variável a cada semi-ciclo.

O conteúdo harmônico gerado pela FAI é bastante amplo. A distorção na forma de onda, resultante da não-linearidade da resistência do arco, gera harmônicos de baixa ordem na corrente (terceiro ao décimo harmônico aproximadamente). A diferença de amplitude entre os semi-ciclos positivo e negativo, é o principal fator que ocasiona o surgimento de harmônicos de ordem par da fundamental. A intermitência aleatória e a descontinuidade da corrente gerados pela ignição e reignição do arco, provocam o aparecimento de harmônicos de alta frequência. Por fim, a variação da amplitude de corrente ao longo do tempo provoca o aparecimento de harmônicos intercalados (frequências não múltiplas da fundamental) (NAKAGOMI, 2006).

Essa variação de amplitude está relacionada à diversos fatores, um deles, é a acomodação do condutor ao solo. O outro, se dá pelo fato de que, quando o condutor

entra em contato com a superfície, cria pequenos arcos. Com isso, há geração de calor e consequentemente carbonização e vitrificação nos pontos de contato com o solo, criando um caminho de ionização, chamado fulgurito. Sendo assim, as regiões de centelhamento migram pra os limites destes "caminhos", que vai se alastrando e constrói uma espécie de eletrodo de aterramento para a corrente de defeito, distribuindo-a no Solo progressivamente. Esse crescimento acontece de forma aleatória, e é conhecido como fase de *buildup* da corrente de falta de alta impedância. Durante essa fase, pode ocorrer ainda outro fenômeno, chamado de *shoulders*, onde a amplitude da corrente se mantém constante por alguns ciclos.

Uma comprovação dessas características mencionadas anteriormente, é uma oscilografia de um ensaio realizado pela CESP em 1985 na subestação de Conchas. Tal oscilografia pode ser observada na Fig.5. Nela, é possível ver de forma clara a fase de *buildup* e os trechos onde ocorrem os *shoulders*. Este ensaio, foi realizado, lançando um cabo energizado a partir de um veículo de manutenção de linhas vivas, e foi repetido em vários pontos ao redor da subestação. Em todos os teste, a corrente de falta apresentou o mesmo tipo de comportamento.

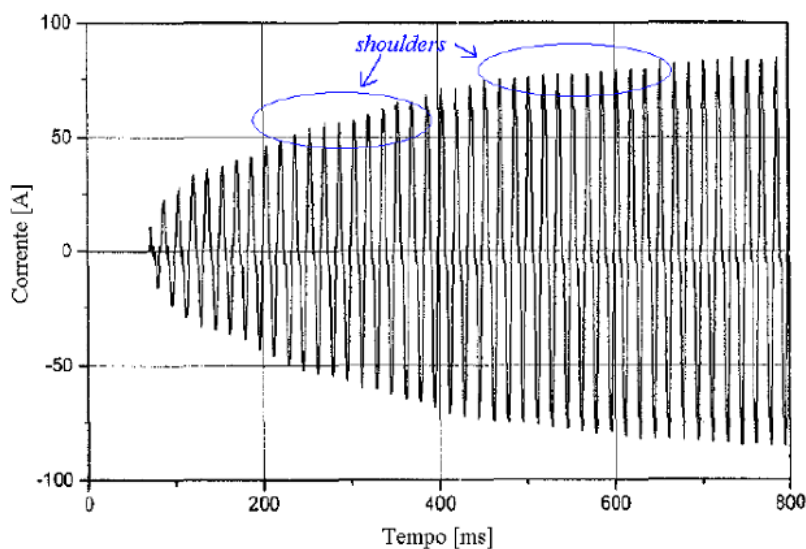


Figura 5 – Fase de *buildup* e detalhes dos *shoulders* (NAKAGOMI, 2006)

Outra característica que vale observar, é que a natureza da falta de alta impedância é altamente resistiva, enquanto a maioria dos arcos elétricos tem características indutivas. Nas FAIs, o tamanho do arco e a intensidade da corrente, são bem menores se comparados a arco em outras condições, como por exemplo, em uma linha de transmissão, um arco pode ser sustentado até por alguns metros. Ainda, vale ressaltar, que as grandezas envolvidas na formação de um arco, irão depender das condições geométricas, espaciais, ambientais e elétricas do sistema (NAKAGOMI, 2006).

2.4 Dispositivos de Proteção em Redes Aéreas de distribuição

Nesta seção será apresentada uma pequena introdução sobre as definições e princípio de funcionamento dos principais dispositivos de proteção encontrados em sistemas de distribuição de energia elétrica. As informações aqui contidas podem ser encontradas em (DISTRIBUIÇÃO, 1982). Os equipamentos comumente usados são:

- Chaves-fusíveis;
- Religadores automáticos;
- Seccionadores automáticos;
- Relés com disjuntores.

2.4.1 Chaves-fusíveis

É um dispositivo constituído de um porta-fusível e outra parte destinada a receber um elo fusível. Cada tipo de fusível é projetado para suportar uma corrente nominal, que é um valor de corrente que este pode suportar continuamente sem deteriorar-se ou exceder os limites de temperaturas especificados, satisfazendo as características de tempo/corrente dessa especificação.

Com a circulação de uma sobrecorrente em uma chave-fusível, devido ao efeito térmico, o elemento fusível se funde, interrompendo o circuito. A alta temperatura do arco provoca a queima do revestimento interno do cartucho, gerando gases que interrompem o arco no instante que a corrente passa por zero. Com isso, a pressão interna do cartucho aumenta, criando condições dentro do tubo que ajudam a desionizar o caminho do arco. Essa pressão também ajuda a manter a condição de circuito aberto, uma vez que as partículas ionizadas forçam a abertura das extremidades do cartucho, sendo expelidas em seguidas.

2.4.2 Religador Automático

É um dispositivos interruptor automático, que abre e fecha seus contatos repetidas vezes quando ocorre uma falta no circuito por ele protegido.

Esse equipamento opera quando detecta corrente de curto-circuito, desligando e religando automaticamente os circuitos por um número predeterminado de vezes. Quando uma sobrecorrente é detectada, ocorre a abertura de seus contatos, e estes são mantidos abertos durante um certo tempo, chamado *tempo de religamento*, depois disso, os contatos se fecham, energizando a linha. Se, ao fechar os contatos, a sobrecorrente persistir, a sequência abertura/fechamento é repetida três vezes consecutivas e, após a quarta abertura, os contatos ficam abertos e travados. O novo fechamento só ocorrerá de forma manual.

2.4.3 Seccionador Automático

É um equipamento utilizado para interrupção automática de circuitos, que abre seus contatos quando o circuito é desenergizado por um equipamento de proteção situado à sua retaguarda e equipado com dispositivo para religamento automático.

Basicamente, é construído por um sensor de sobrecorrente e de um mecanismo para contagem de desligamentos do equipamento de retaguarda, além de contatos e de dispositivos para travamento na posição "aberto". Quando uma sobrecorrente é detectada, o equipamento é armado e preparado para contagem. A contagem inicia quando a corrente que circula por ele é interrompida ou cai abaixo de determinado valor. Após um certo número de ocorrências, que corresponde ao ajuste do equipamento, seus contatos são abertos e permanecem travados, isolando o trecho em falta.

2.4.4 Relés com Disjuntores

O disjuntor é um dispositivo destinado a fechar ou interromper um circuito de corrente alternada sob condições normais, anormais ou de emergência.

Os dispositivos que supervisionam constantemente todas as grandezas de um sistema elétrico, ou seja, tensões, correntes, frequência, potências, bem como grandezas inerentes aos próprios componentes, como temperatura, pressão, etc., são chamados *relés*.

Por sua vez, os disjuntores, são dispositivos mecânicos de abertura e fechamento comandados pelos relés. Ao detectarem perturbações que venham a comprometer o funcionamento normal do sistema, os relés, enviam um sinal elétrico que comanda a abertura de um ou mais disjuntores, isolando os equipamentos ou parte do sistema afetado pela ocorrência.

2.5 Métodos Existentes de detecção de FAIs

Grande parte das referências estudadas para o desenvolvimento deste trabalho, tinham em comum a detecção das FAIs pelo conteúdo harmônico gerado pelo arco elétrico, como visto anteriormente. Na maioria dos casos, a ferramenta matemática utilizada para extração dessas características, era a Transformada Wavelet. Outra forma, é a detecção de rompimento de condutores de forma mecânica. Ambas as formas serão exemplificadas nesta seção.

Após montar um sistema teste de simulação de FAI no programa *ATP/EMTP*, utilizando dados reais registrados em uma subestação, Torres et al. (2011) usaram Transformada Wavelet Discreta (TWD) para análise do sinal de corrente do alimentador desse sistema, na fase em que havia ocorrido a falta.

Aqui, é importante lembrar que a Transformada Wavelet consegue trabalhar no domínio do tempo e da frequência simultaneamente. O sinal amostrado é dividido, em cada nível de decomposição, entre uma aproximação do sinal em frequência inferiores e em detalhes onde aparecem as componentes de frequências elevadas.

A Fig.6 mostra o resultado da aplicação da TWD na fase do alimentador que ocorreu a falta de alta impedância. Nessa figura é possível observar a aproximação em baixa frequência (A4) e os detalhes das decomposições (D1, D2, D3 e D4), com suas respectivas amplitudes.

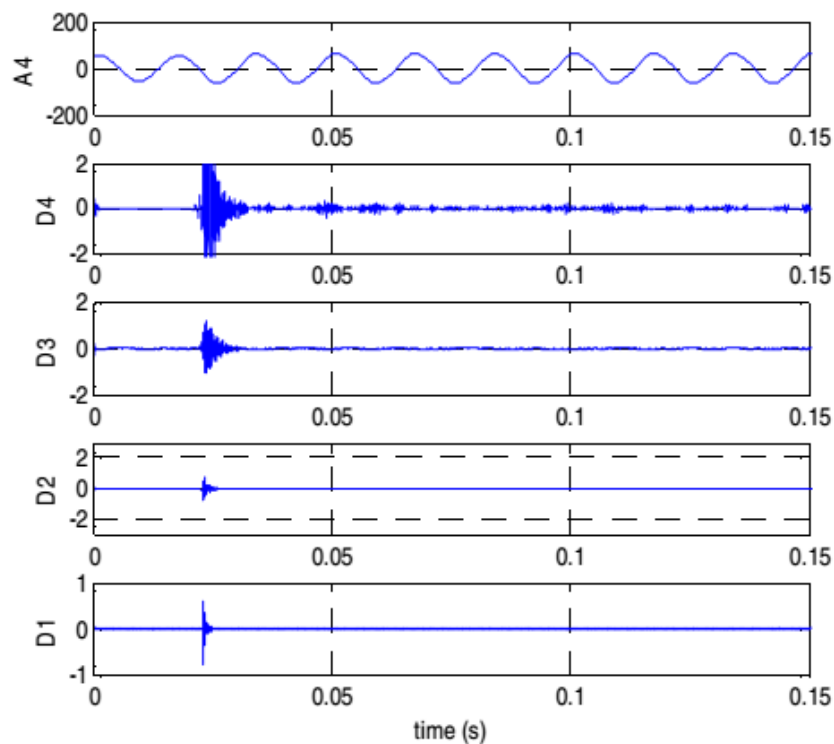


Figura 6 – Decomposições da TWD na fase em falta do alimentador (TORRES et al., 2011).

Uma comparação importante, é apresentada na fig.7, onde a decomposição D3 é aplicada nas três fases do alimentador. Fica evidente que, na fase (a), na qual foi ocasionada a FAI, componentes de alta frequência em toda a extensão da janela, enquanto na demais fases, essas componentes só aparece no instante inicial da falta.

Para melhor entender essa diferença, é feito um somatório do valor absoluto de todos os componentes de alta frequência contidos na decomposição D3, conforme 2.1. Na fig.8 pode-se observar que no resultado desse somatório, a fase (a) em que ocorreu a falta, apresenta um valor quase três vezes maior do que as demais fases.

$$S(k) = \sum_{n=k-N+1}^k |D3(n)| \quad (2.1)$$

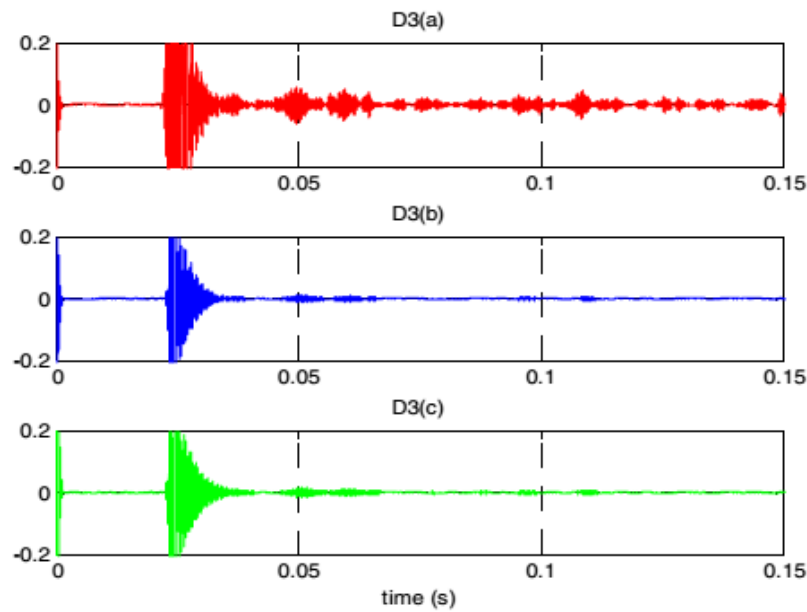


Figura 7 – Decomposição D3 de todas as fases do alimentador (TORRES et al., 2011).

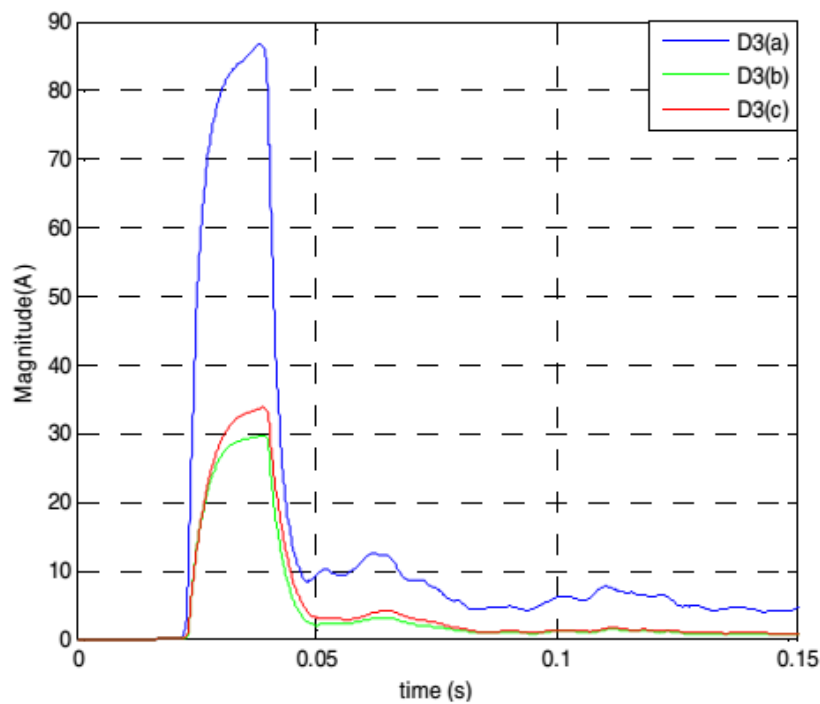


Figura 8 – Somatório do valor absoluto da decomposição D3 para todas as fases do alimentador (TORRES et al., 2011).

Onde $S(k)$ é o detector, n corresponde à amostragem e N é o número da janela amostrada.

Outra maneira de detecção de FAIs utilizando os Coeficiente Wavelet Contínuo é proposta no trabalho de Michalik et al. (2006). Para isso, foi montado um sistema teste no *ATP/EMTP* para simulação de um sistema de distribuição. Para simular o arco elétrico,

foi usado o bloco MODELS do programa, o qual, a partir dos valores de tensão e corrente medidos no ponto onde era simulado a falta, alterava o valor de uma resistência variável pelo uso da equação geral do arco, vista no primeiro capítulo.

Com os resultado das simulações, era aplicada a CWC para tensão e corrente de seqüência zero nas fases do alimentador. A detecção era feita com base na defasagem entre o resultado dos CWCs dessas tensões e correntes. A Fig.9 mostra o resultado dessa transformada, bem como, a defasagem entre as grandezas.

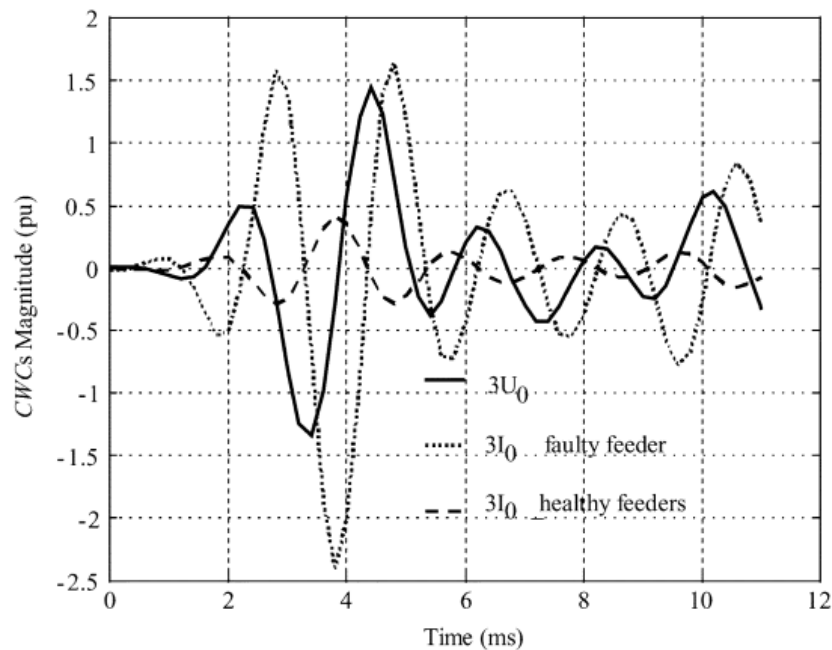


Figura 9 – Defasagem entre os CWCs da tensão e corrente de seqüência zero da fase em falta e de uma fase em condições normais (MICHALIK et al., 2006).

Um outro método interessante, proposto por Neto (2005), é a implantação de sensores de corrente com comunicação via rádio. Com isso, era aplicado um sensor para cada fase que monitoram os valores de corrente e enviam sinal para uma central. Se a defasagem angular entre as correntes de fase chegar próximo a 180° entende-se que ocorreu uma FAI. A Fig.10 mostra o sensor de corrente que deve ser instalado em torno do condutor.

Outro tipo de sensor, utilizado por Neto (2005), é o extensômetro. Estes sensores variam sua resistência elétrica de acordo com a deformação física que experimentam. A ideia é que, quando um condutor se rompe, ocorre mudanças na tração mecânica dos isoladores que sustentam esse condutor. Esse tipo de sensor pode ser instalado tanto nos isoladores de pino como nos de ancoragem, sendo que no segundo a variação de tração é muito maior que a do primeiro. A Fig.11 demonstra a aplicação de extensômetros num isolador de ancoragem.



Figura 10 – Sensor de corrente com comunicação via rádio (NETO, 2005).

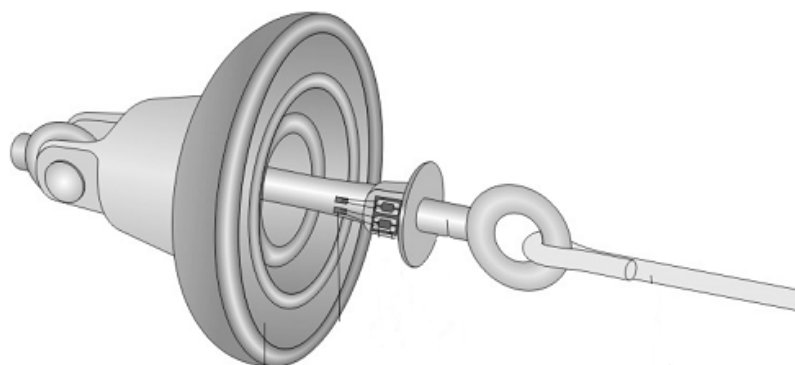


Figura 11 – Isolador de ancoragem com o extensômetro (NETO, 2005).

2.6 Considerações Finais

De acordo com os temas apresentados neste capítulo, é possível perceber porque ainda não existe uma solução viável para o problema de falta de alta impedância. Isso ocorre pois os dispositivos de proteção convencionais, trabalham, de alguma forma, com base em sobrecorrentes. Também, para detectar FAIs, é necessário conhecer o comportamento dos transitórios que são comuns ao sistema, como chaveamento de banco de capacitores, energização de transformadores, entre outros. O capítulo abordou também sobre o rico conteúdo harmônico que uma FAI pode apresentar dependendo das condições do ambiente, o que faz com que os métodos que utilizam ferramentas matemáticas, como Transformada Wavelet, serem bastante eficazes. Outros fenômenos importantes ocorridos nas FAIs, como fase de *buildup*, também foram apresentados. Porém este tipo de falta pode apresentar tanto um comportamento firme quanto errático, sendo as vezes uma senoide comum, outras vezes um sinal com conteúdo harmônico considerável, dependendo mais do arco elétrico e

da resistência do solo do que da impedância do sistema.

3 Técnica Proposta para Detecção de FAIs

3.1 Considerações Gerais

O presente Capítulo descreve a metodologia proposta para detecção das FAIs, bem como a técnica utilizada para a detecção de transitórios em sistemas elétricos de potência, cuja atuação inicia o processo de classificação das faltas de alta impedância. Ressalta-se que a técnica proposta é capaz de identificar se o transitório ocorrido é ou não uma falta de alta impedância. Diferentemente das demais técnicas encontradas na literatura, o algoritmo proposto detecta esse tipo de falta pela característica de *buildup*, própria das FAIs, ocorrida após um transitório e não pelo conteúdo harmônico do sinal de corrente gerados por ela, como feito pela maioria das técnicas existentes.

3.2 Detecção de Transitórios

A técnica utilizada para detecção de eventos transitórios, foi proposta no trabalho de Santos (2011). Tal técnica fundamenta-se no cálculo do 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. Inicialmente, é calculado o valor da 1ª função-diferença do sinal de corrente (i_a) para a amostra atual (n) através da equação 3.1.

$$del_1(n) = i_a(n) - i_a(n - 1) \quad (3.1)$$

Os valores de $del_1(n)$ e $i_a(n)$ são colocados como pares ordenados num plano cartesiano dado por $del_1 \times i_a$. Nesse plano, o movimento dos pontos $P(n) = (del_1(n), i_a(n))$ descreve uma trajetória bem definida em torno da origem do referido plano durante a operação normal do sistema, como mostra a Fig.12.

Nessas condições, a distância entre dois pontos consecutivos é relativamente pequena. Entretanto, quando ocorre um transitório no sistema elétrico que altere bruscamente a forma de onda da corrente amostrada, os pontos são desviados da trajetória de operação normal. No instante que ocorre essa variação brusca, a distância entre pontos consecutivos sofre um incremento elevado de forma súbita. Essa variação pode ser observada na Fig.13, onde a reta traçada entre os pontos $P(n-1)$ e $P(n)$ representam a distância entre o último ponto antes da ocorrência do transitório e o ponto após a ocorrência do mesmo.

Dessa forma, calculando a distância euclidiana entre pontos consecutivos no plano $del_1 \times i_a$, pode-se determinar a ocorrência de um transitório. A distância euclidiana é dada

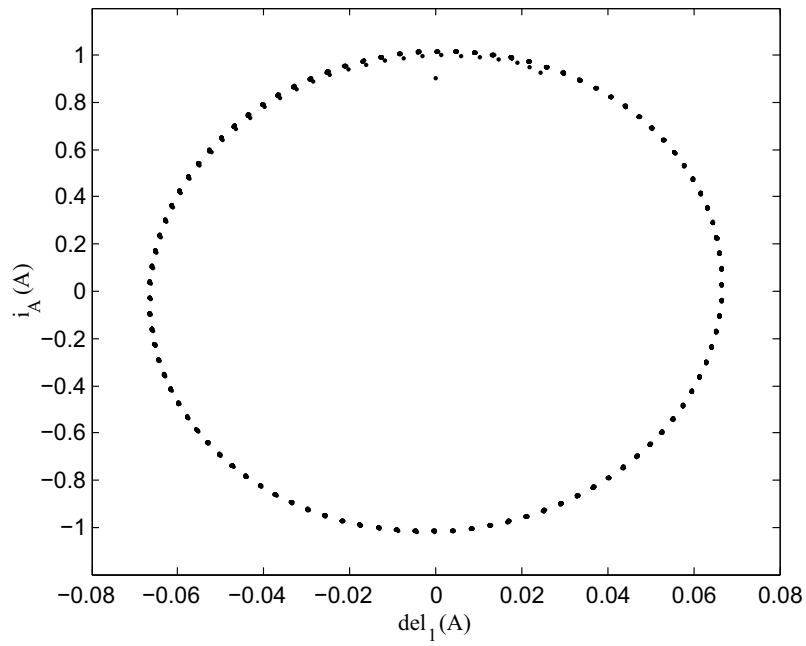


Figura 12 – Plano formado por del_1 e i_a antes da ocorrência do transitório.

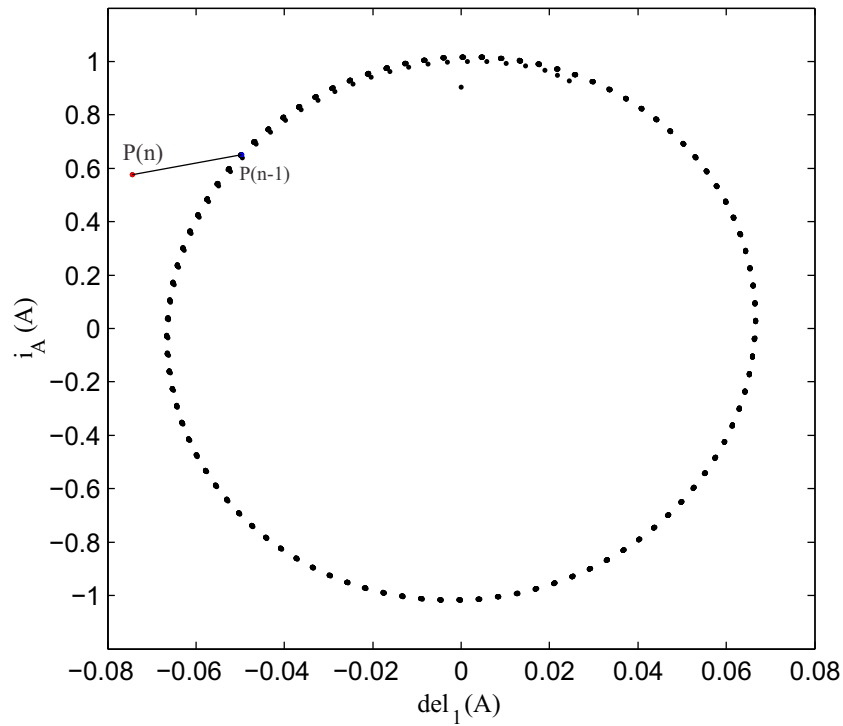


Figura 13 – Plano formado por del_1 e i_a no momento em que ocorre o transitório.

por 3.2.

$$dist_1 = \sqrt{(del_1(n) - del_1(n-1))^2 + (i_a(n) - i_a(n-1))^2} \quad (3.2)$$

O valor de ajuste para a detecção de um transitório é calculado conforme 3.3 e é atualizado a cada nova amostra.

$$Th_{trans}(n) = \mu(janela(n)) + 1,2 \times \sigma(janela(n)) \quad (3.3)$$

Onde μ e σ representam, respectivamente, a média e o desvio padrão da janela de dados, a qual contém um número de amostras equivalente a um ciclo (isto é, N amostras). Ressalta-se que essa metodologia foi desenvolvida e testada para uma amostragem de 11,52 kHz, o que corresponde a N igual a 192 amostras por ciclo para uma frequência fundamental de 60 Hz.

A cada novo valor de $dist_1$, a primeira amostra da janela (da extremidade esquerda) é descartada e os termos restantes são deslocados para a esquerda. O valor atual de $dist_1$ é colocado na última posição, ou seja, a mesma é alocada na extremidade direita da janela. Por exemplo, para $N = 96$, a janela de dados é atualizada conforme as Equações 3.4 e 3.5:

$$janela_1(n) = [dist_1(n - 95) \quad dist_1(n - 94) \quad \dots \quad dist_1(n)] \quad (3.4)$$

$$janela_1(n + 1) = [dist_1(n - 94) \quad dist_1(n - 93) \quad \dots \quad dist_1(n) \quad dist_1(n + 1)] \quad (3.5)$$

Assim, um transitório é detectado quando a condição dada pela Expressão 3.6 for satisfeita. A Fig.14 mostra um exemplo da atuação do detector de transitório para uma falta que acontece em 0.22s.

$$dist_1(n) > Th_{trans}(n) \quad (3.6)$$

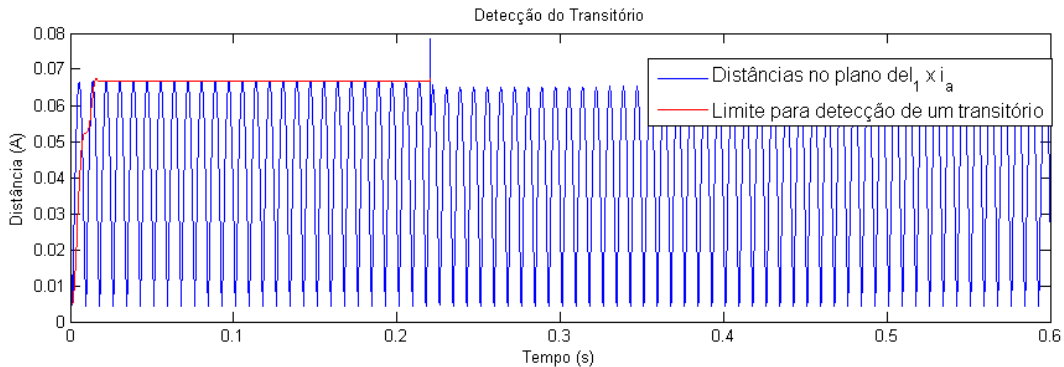


Figura 14 – Exemplo do detector de transitório.

3.3 Classificação de FAIs

Após detectado um transitório, inicia-se o processo de verificação e classificação da FAI. Isto é realizado com base na característica da fase de *buildup* da corrente resultante da falta.

Para todo o sinal amostrado é retirada a característica da envoltória do mesmo. Isto é feito através da obtenção do valor máximo de uma janela de dados contendo N amostras de corrente i_a , a qual é atualizada de forma semelhante à janela descrita anteriormente, de acordo com 3.7.

$$env_1(n) = \max(janela_2(n)) \quad (3.7)$$

O sinal de env_1 é filtrado em um filtro de média para uma janela contendo N valores de env_1 , conforme 3.8.

$$env_2(n) = \mu(janela_3(n)) \quad (3.8)$$

Após a eliminação do resíduo do filtro de valores máximos, o qual mantém o valor máximo do sinal de corrente no momento da ocorrência do transitório por um ciclo, e da estabilização do sinal de env_2 , fica caracterizado o valor de Th_{FAI} . Uma falta de alta impedância será classificada sempre que, após a detecção de um transitório, as condições expressas em 3.9 e 3.10 forem satisfeitas por pelo menos dez ciclos.

$$env_1(n) > Th_{FAI} \quad (3.9)$$

$$env_2(n) > env_2(n - 1) \quad (3.10)$$

Um fluxograma que envolve todos os processos da técnica proposta, incluindo o detector de transitórios e o classificador de FAIs, é mostrado na Fig.15.

3.4 Considerações Finais

A técnica para detecção de transitórios apresentada neste Capítulo foi testada para diversas condições operacionais e mostrou-se altamente confiável para este tipo de aplicação. A partir do detector de transitórios, foi possível se obter uma técnica robusta e de fácil implementação para a classificação de FAIs. Uma vez que o algoritmo exige cálculos mais simples e utiliza a fase de *buildup* da corrente de falta para a classificação, o mesmo pode ser facilmente implantado em lógicas de relés digitais. Por fim, dada a alta robustez e qualidade apresentadas pela metodologia proposta, afirma-se que a mesma pode ser uma

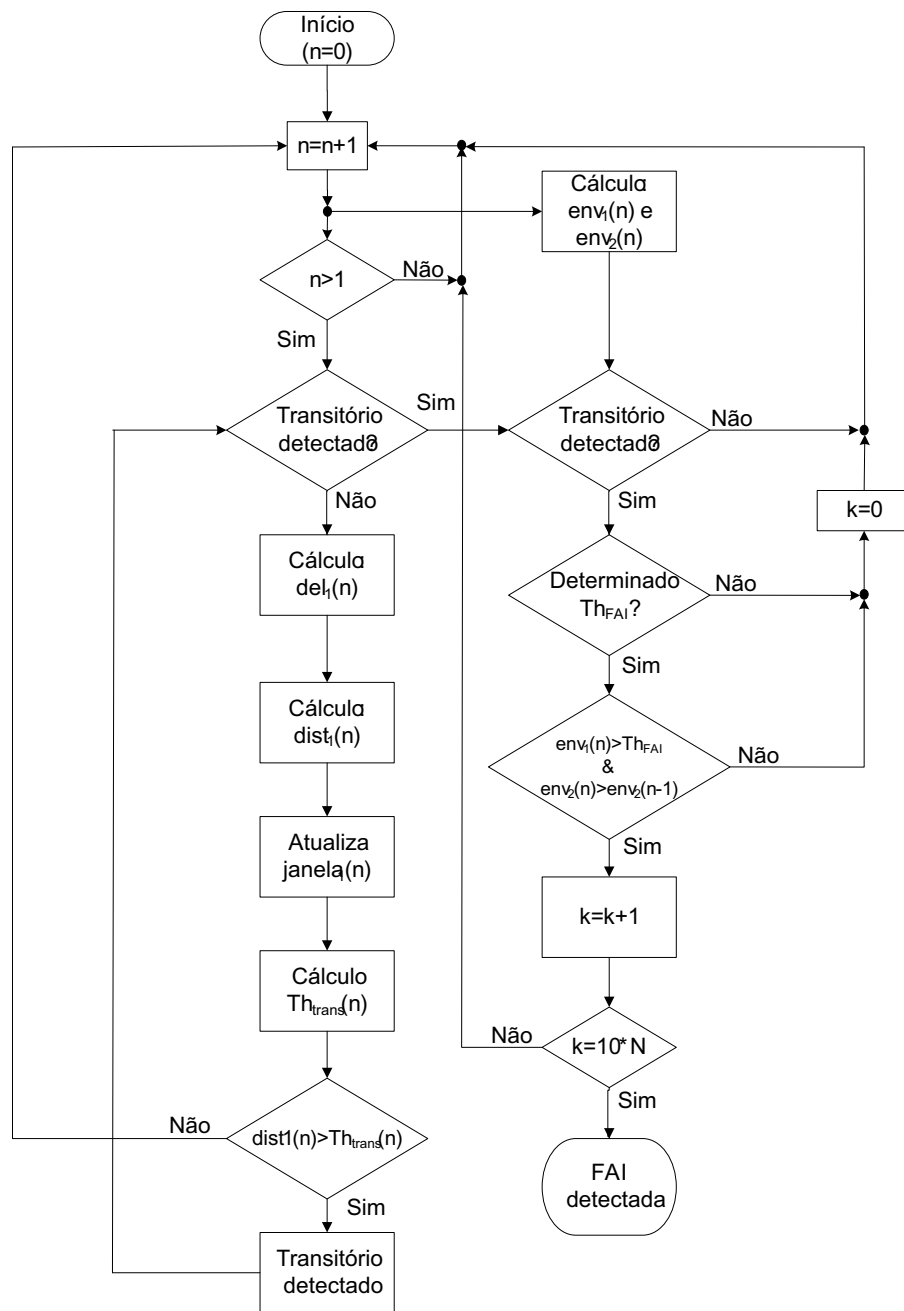


Figura 15 – Fluxograma.

alternativa em relação às demais técnicas existentes, além de poder ser utilizada como ferramenta adicional de classificação, complementando metodologias de classificação de eventos transitórios implementadas em elementos microprocessados de proteção, utilizados em subestações e plantas geradoras de energia elétrica.

4 Simulações e Resultados

4.1 Considerações Gerais

O presente Capítulo descreve o sistema teste utilizado neste estudo, o qual simula uma subestação contendo dois alimentadores com características distintas, sendo um rural e outro urbano. Além disso, é apresentado o modelo computacional usado para simular as faltas de alta impedância. Serão detalhados quatro casos analisados, sendo dois eventos de faltas de alta impedância, um de entrada e um de saída de carga, afim de demonstrar a eficácia do método proposto.

A ferramenta computacional utilizada para realização das simulações foi o ATP ("Alternative Transients Program"), o qual é um programa amplamente utilizado para simulação de eventos transitórios em sistemas elétricos de potência.

Para implementar os algoritmos e tratar os sinais gerados pelo ATP, foi utilizado o programa MATLAB[®].

4.2 Sistema Teste

Para simular e validar a técnica proposta no Capítulo anterior, foi montado um sistema teste similar ao sistema encontrado no trabalho de Farias (2013). Tal sistema é composto por dois alimentadores principais. O primeiro possui extensões de linhas menores e cargas mais concentradas, representando um alimentador urbano. O segundo possui extensões de linhas mais prolongadas e alocação de cargas mais espalhadas, o que vem a representar um alimentador rural. Ambos os alimentadores são da classe de tensão de 15 kV, provenientes de uma mesma subestação rebaixadora (69/13,8 kV). Neste estudo, foi considerado também que o TAP do transformador estava ajustado para 14,1 kV. O diagrama unifilar do sistema teste em questão pode ser visualizado na Fig.16.

As faltas de alta impedância foram simuladas em todas as seis barras que estão numeradas no sistema. Também foram simuladas, em pontos estratégicos do sistema, faltas de alta impedância com variados valores iniciais de resistência de falta e para incidências de falta durante picos e zeros de tensão. Ainda, a fim de verificar a atuação da metodologia para situações onde não se deseja a classificação do evento como sendo uma FAI, foram simulados casos de entrada e saída de ramais. Além disso, as impedâncias dos cabos acumuladas nos trechos dos alimentadores foram consideradas iguais em cada fase e seus respectivos valores de sequência positiva podem ser vistos na tabela 2.

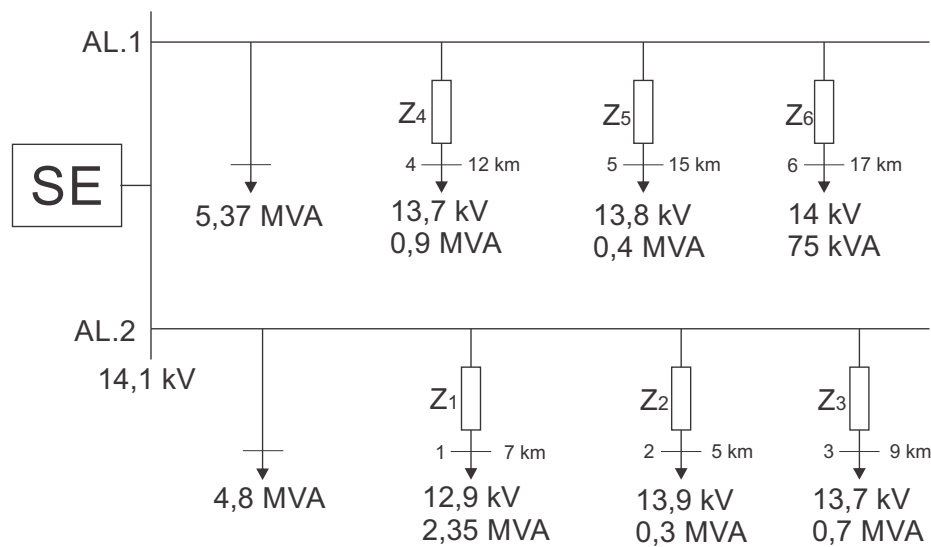


Figura 16 – Sistema teste utilizado para validar o algoritmo.

Tabela 2 – 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

4.3 Modelo Computacional Utilizado para Simulação da FAI

Entre os modelos existentes encontrados na literatura, o escolhido para ser utilizado neste trabalho foi o proposto por Nakagomi (2006). Este modelo é constituído por duas resistências variáveis, *HZR1* e *HZR2*, conectadas em série. A primeira é responsável por produzir as distorções e assimetrias, que são características presentes nas faltas de alta impedância, durante todos os ciclos da corrente de falta. A segunda resistência apresenta valor inicialmente elevado e que vai diminuindo ao longo do tempo, fazendo com que a corrente cresça de forma típica, caracterizando assim, a fase de *buildup* do sinal de corrente. Ambas as resistências são controladas pela ferramenta *MODELS* encontradas nos componentes do programa *EMTP/ATP*.

O modelo desenvolvido por Nakagomi (2006) ainda conta com três chaves, que também são controladas por *TACS* (TACS-controlled TYPE 13 switch do ATPDraw[®]). Uma representação do arranjo desse modelo está representado na Fig.17. As chaves t_1 e t_2

definem, respectivamente se a falta ocorrerá do lado da fonte ou do lado da carga. Através de uma interface gráfica do bloco, o usuário escolhe qual dessas chaves vai ser comutada, bem como, a resistência inicial de *HZR2*. Já a chave t_3 controla o tempo que o condutor demora a chegar até o solo. Esse tempo equivale a 1,3 segundos e não pode ser modificado pelo usuário.

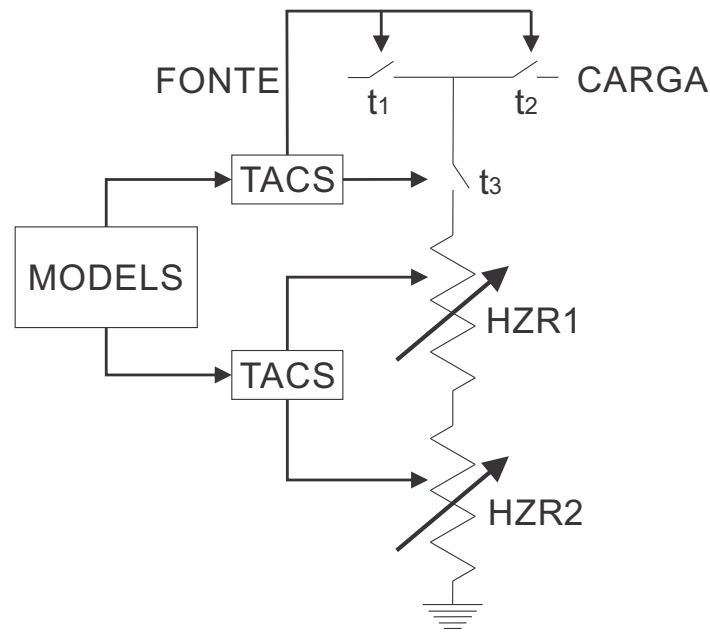


Figura 17 – Modelo computacional para simulação de FAIs desenvolvido por Nakagomi (2006).

4.3.1 Controle da Resistência HZR1

O objetivo desta resistência é produzir a distorção e assimetria na forma de onda da corrente, que são características das faltas de alta impedância. Para obter esses resultados, foi implementado no bloco *MODELS* uma rotina que, para cada instante de tempo, calcula um valor para *HZR1* em função do respectivo valor da tensão no ponto de falta. Essa rotina reproduz uma característica $V \times I$ da falta, a qual é mostrada na Fig.18. Essa curva é constituída de dois semi-ciclos (positivo e negativo). O semi-ciclo positivo contém os valores que definem o aumento da tensão e da corrente, que parte do menor ao maior valor dessas grandezas. De forma oposta, o semi-ciclo negativo é definido pelos pontos que iniciam no maior valor de tensão e corrente e terminam nos menores valores dessas grandezas. Como também pode ser observado na Fig.18, a curva sobe pelos pontos vermelhos (semi-ciclo positivo) e retorna pelos pontos azuis (semi-ciclo negativo). Dada a tensão no ponto de falta em determinado instante de tempo, a partir da característica $V \times I$ obtém-se a corrente de falta e a seguir calcula-se a correspondente resistência. Ou seja, definida a tensão na entrada do controle de *HZR1* e conhecendo-se seu sentido (derivada positiva ou negativa), calcula-se a corrente por meio de uma interpolação simples.

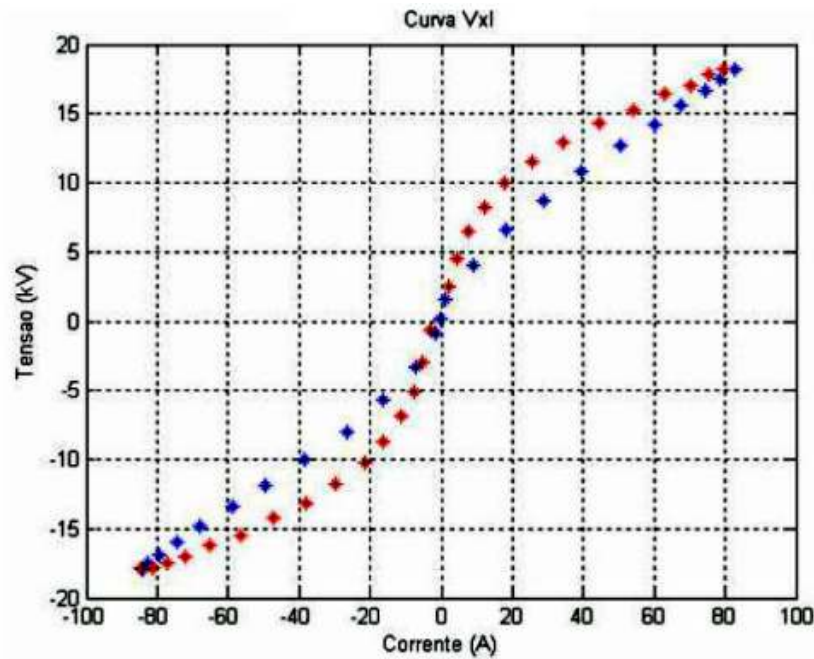


Figura 18 – Característica $V \times I$ para falta de alta impedância (NAKAGOMI, 2006).

De modo a evitar a necessidade de se levantar as características $V \times I$ de cada sistema e flexibilizar a utilização do modelo, Nakagomi (2006) fez uso de uma curva característica $V \times I$ com valores por unidade (p.u), utilizando as bases de acordo com 4.1, generalizando a utilização deste modelo.

$$\begin{cases} V_{BASE} = V_{nominal\ de\ fase} \\ I_{BASE} = \frac{V_{base}}{R_{falta}} \end{cases} \quad (4.1)$$

Onde V_{BASE} e R_{falta} correspondem, respectivamente à tensão nominal de fase do alimentador e a máxima resistência de falta no ponto onde ocorreu o evento.

Fazendo uso dessas bases, qualquer curva pode ser convertida para p.u. Ao informar a tensão nominal do sistema e a resistência de falta, a rotina desnormaliza a curva, utilizando-a normalmente. Com isso, tem-se a vantagem de trabalhar com qualquer valor de R_{falta} sem ter de alterar os valores dos pontos da curva característica $V \times I$, ou seja, as correntes de falta terão diferentes amplitude mas com as mesmas características. O gráfico da curva com os valores normalizados encontra-se na Fig.19

4.3.2 Controle da Resistência HZR2

O controle da resistência $HZR2$ faz com que ocorra o crescimento da corrente durante o tempo de acomodação do condutor no solo, fenômeno chamado de *buildup*. Para isso, essa resistência deve ter um valor inicial elevado e reduzir-se gradativamente até valores próximos à zero. O controle de $HZR2$ implementado no bloco *MODELS* é baseado

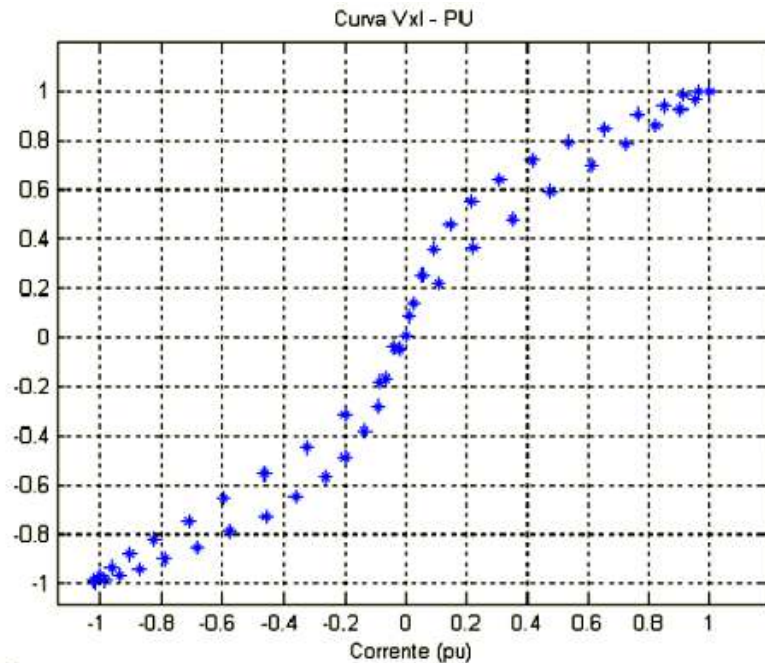


Figura 19 – Curva VxI de da falta de alta impedância com valores em p.u. (NAKAGOMI, 2006).

na equação 4.2.

$$HZR2 = 10R_{falta}2,9030970612e^{-0,27311517629\frac{25t}{0,8}} \quad (4.2)$$

A resistência total do modelo é dada pela soma das resistências HZR1 e HZR2, como mostra a Fig.17. Os resultados da utilização desse modelo podem ser vistos nas figuras 20 e 21. A primeira mostra o gráfico da corrente no ponto de uma falta ocorrida em 0,22s, no ponto 2 do sistema teste, com uma resistência de falta de 250Ω. Nela é possível observar claramente a fase de *buildup*. A segunda figura mostra de forma ampliada alguns ciclos da corrente de falta, onde pode-se observar as distorções causadas pelo arco elétrico.

4.4 Resultados

Para testar o funcionamento da técnica proposta foram simulados diversos casos, utilizando os sinais de corrente gerados no *EMTP/ATP*, com base no sistema teste da Fig.16. Os casos envolveram faltas de alta impedância do lado da fonte, com $R_{falta} = 250\Omega$, no instante de 0,22s, em todos os seis pontos indicados no sistema teste. Também, em alguns desses pontos, foram feitas simulações com R_{falta} iguais a 100, 350 e 450Ω, para a incidência de falta em variados instantes de tempo, de modo a se obter diferentes formas de assimetria do sinal de corrente. As simulações ainda contaram com um caso de entrada e um de saída de carga. Dentre os casos analisados, uma vez que os resultados apresentaram similaridades, somente duas ocorrências de FAI e as situações de entrada e

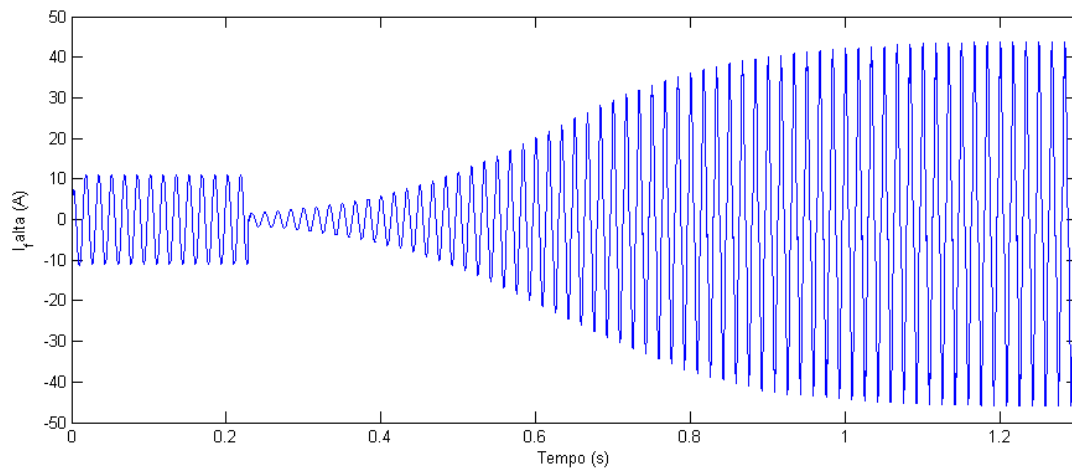


Figura 20 – Forma de onda da corrente no ponto de ocorrência da falta de alta impedância.

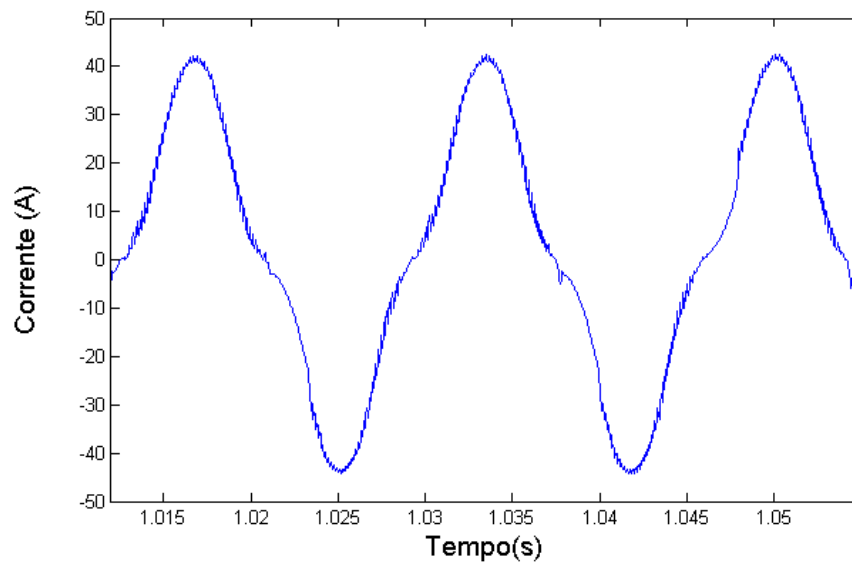


Figura 21 – Detalhe das distorções características do sinal de corrente para uma FAI.

saída de carga serão detalhados. O primeiro caso de FAI, ocorrida no ponto 2 do sistema, apresenta uma variação de corrente significativa, o que facilita sua detecção e classificação. O segundo, ocorre no ponto 6, que é um ponto bem afastado do alimentador e com uma carga relativamente pequena, o que torna um pouco difícil a detecção, uma vez que a variação de corrente não é tão intensa como a que ocorre para a primeira situação. Os casos de entrada e saída de carga foram simulados no segundo alimentador no ponto 4 do sistema. Os resultados obtidos em todas as situações analisadas encontram-se resumidos na Tabela 3 do Apêndice A. Todas as simulações foram realizadas com uma taxa de amostragem de 192 amostras/ciclo. Ressalta-se que os sinais de corrente foram obtidos a partir da fase A de cada alimentador na saída da subestação.

4.5 Caso 1 - FAI no Ponto 2 do Sistema Teste

O caso 1 envolve uma falta de alta impedância que ocorre no ponto 2 do sistema teste, onde a resistência da falta é de 250Ω , a qual ocorre no instante 0,22s. Os resultados dessa simulação são demonstrados através das Figuras a seguir.

A Fig.22 mostra a corrente total na fase em que ocorreu a falta do respectivo alimentador. No instante em que ocorre a falta, é possível observar uma pequena redução na amplitude da corrente, a qual volta a crescer, alcançando valores semelhantes à condição normal de carga.

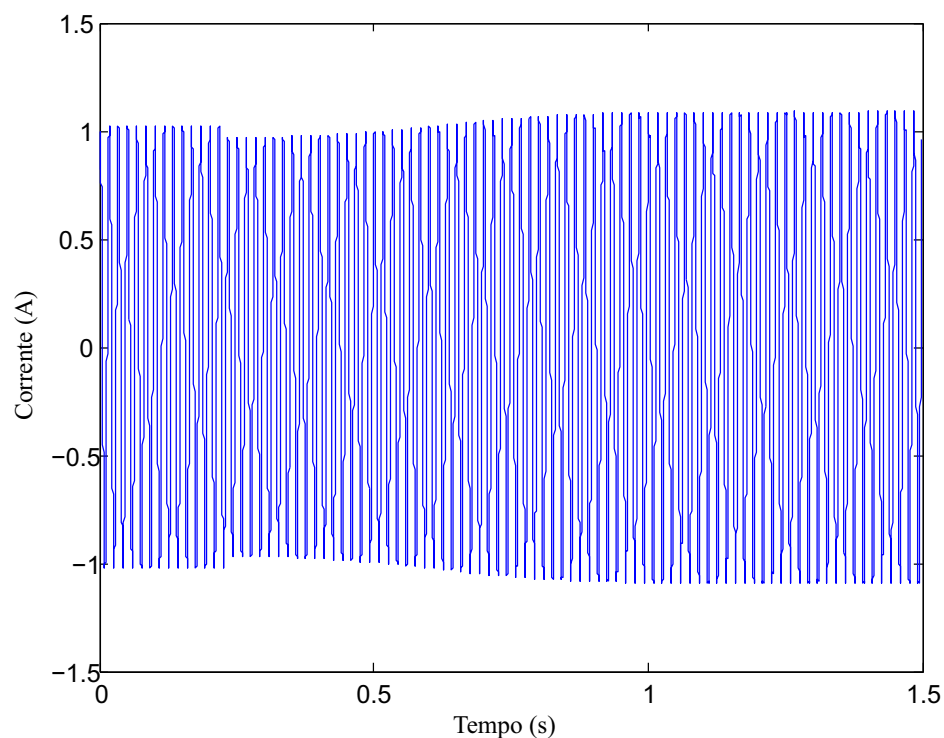


Figura 22 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 1.

A atuação do detector de transitórios para este caso é apresentada na Fig.23. Em (a), pode-se observar o valor da distância entre os pontos no plano $del_1(A) \times i_A$. Já em (b), está representado o estado do referido detector. Quando a distância entre pontos consecutivos no plano $del_1(A) \times i_A$ torna-se maior do que o valor limite, o estado do detector de transitórios muda de zero para um, indicando a ocorrência de um evento na rede. Neste caso, o detector atuou exatamente no momento em que ocorreu a falta, isto é, em 0,22s.

O gráfico contendo a disposição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante em que ocorre a falta é mostrado na Fig.24. O ponto em azul na figura indica o último ponto antes da ocorrência da falta. Já o ponto destacado em vermelho, indica o momento exato em que a FAI ocorre. A reta traçada entre estes dois pontos representa o incremento na distância, o qual indica a ocorrência do transitório, em relação às distâncias entre os pontos

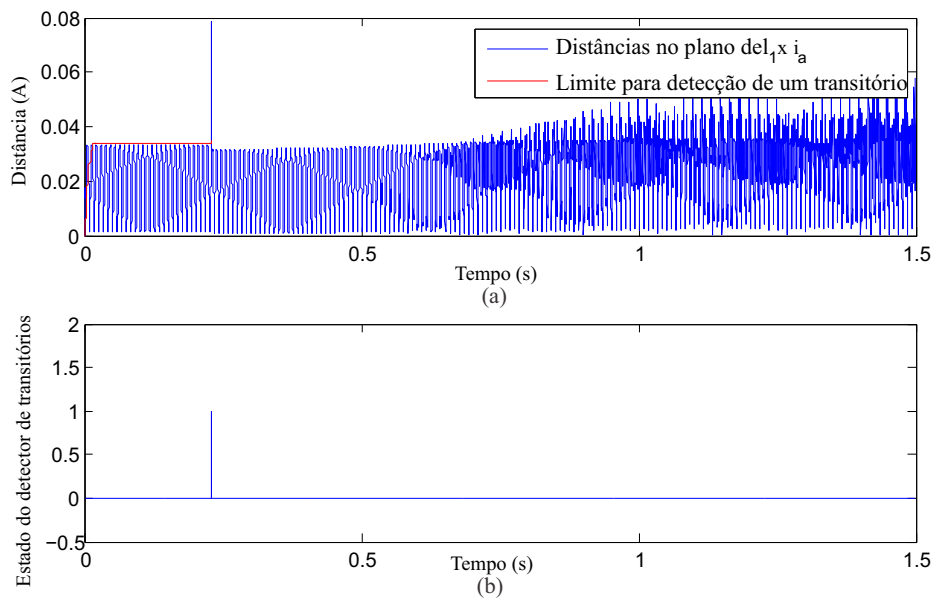


Figura 23 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.

consecutivos em preto, cuja distribuição representa a operação normal do sistema. Além disso, na Fig.25, pode-se observar que, antes da ocorrência da FAI, os pontos estavam distribuídos sobre uma trajetória bem definida (em preto), diferentemente do que ocorre após a ocorrência da FAI (em vermelho).

Após a detecção do transatório, o algoritmo faz a classificação deste como sendo ou não uma falta de alta impedância. Essa classificação é feita pela característica de *buildup* da corrente, como pode ser observado na Fig.26. Os pontos em vermelho e em preto mostrados nessa figura, representam, respectivamente, o instante da detecção do transatório e da classificação evento. Ressalta-se que a classificação ocorreu no instante em que as condições explicadas no Capítulo anterior completam dez ciclos sendo satisfeitas ininterruptamente. Ou seja, a envoltória do sinal foi crescente e a linha indicada em vermelho (Th_{FAI}) apresentou um valor menor do que a envoltória dos valores máximos de corrente (env_1), mostrada em azul na figura, por dez ciclos, caracterizando a falta de alta impedância.

De forma análoga, para todos os casos de falta de alta impedância, o algoritmo conseguiu realizar a detecção do transatório e a correta classificação como FAI com grande robustez e velocidade, mostrando ser eficaz para sua função.

4.6 Caso 2 - FAI no Ponto 6 do Sistema Teste

Este caso foi simulado nas mesmas condições de impedância de falta e de instante de ocorrência do curto-circuito consideradas para o primeiro caso. Entretanto, a FAI foi

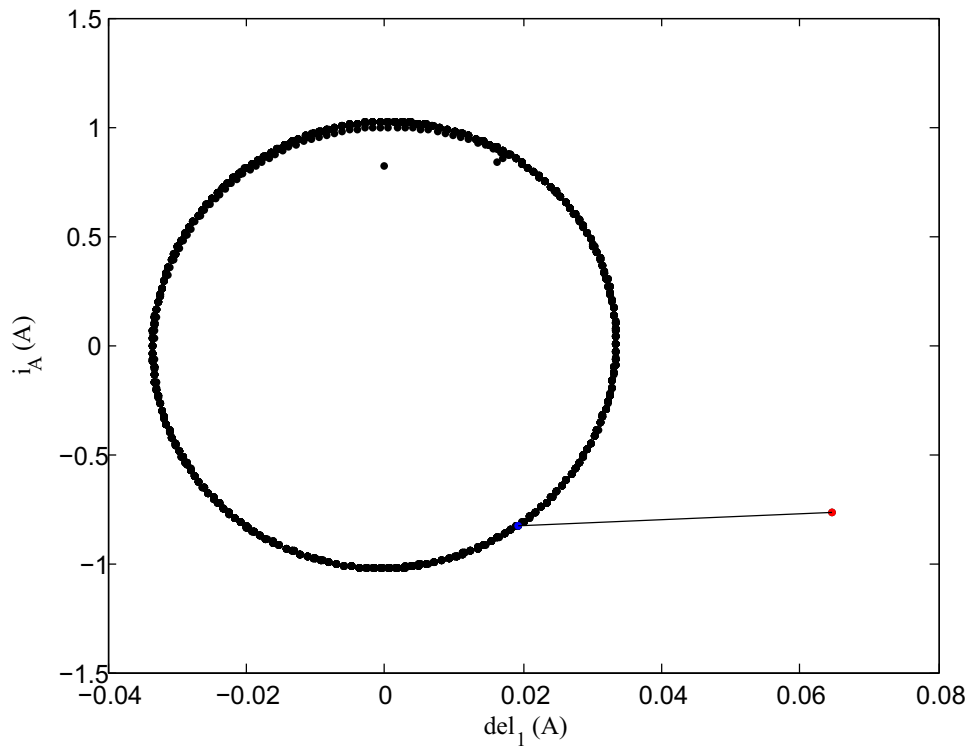


Figura 24 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.

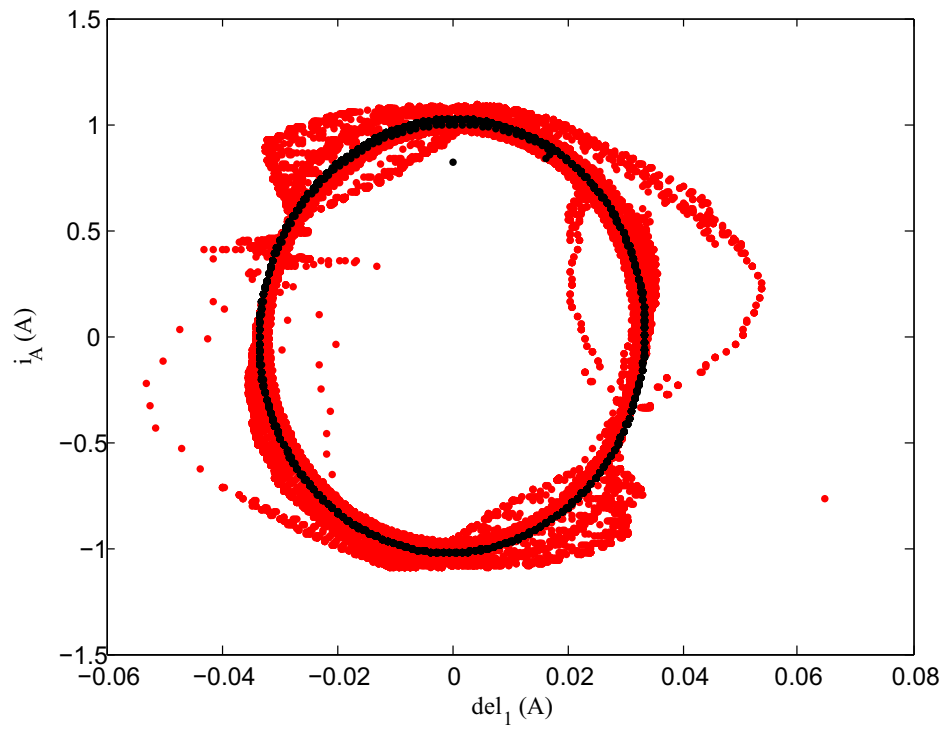


Figura 25 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.

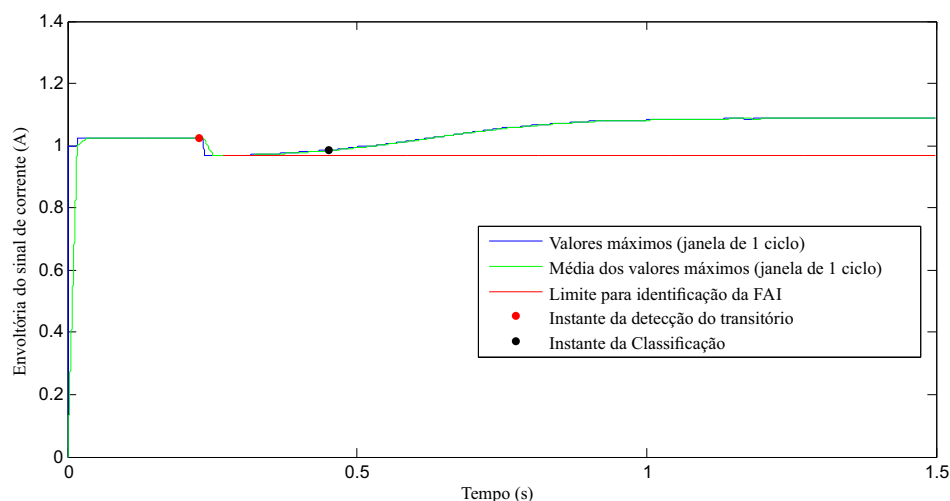


Figura 26 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.

simulada no ponto 6 do sistema teste. Como esse ponto se encontra muito distante da subestação e possui uma carga relativamente pequena (75 kVA) quando comparada as demais cargas conectadas ao alimentador, a detecção deste evento apresenta uma dificuldade maior, uma vez que, quando o condutor romper, a corrente total no alimentador diminuirá de forma quase imperceptível. Apesar disso, após o condutor se acomodar no solo, a corrente no alimentador apresentará a fase de *buildup* e se tornará maior do que era anteriormente sob condições nominais de carga, podendo ser classificada, desde que o transitório seja detectado corretamente. Na Fig.27 é possível observar essas variações na corrente do alimentador. No instante de 0,22s, no qual ocorre o rompimento do condutor, verifica-se que a diminuição na amplitude da corrente é muito pequena. Após isso, a corrente cresce até entrar em regime.

Na Fig.28 (a), a qual mostra a atuação detector de transitórios, é possível observar que, no instante em que ocorre a falta, a distância entre os respectivos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ apresenta um incremento considerável em relação aos valores anteriores, mesmo com a pequena variação da corrente ocorrida no referido instante sob essas condições de falta. Dessa forma, o detector consegue identificar esse transitório, como pode ser visto na Fig. 28 (b). Como a corrente varia pouco na queda do condutor, devido a carga desconectada ser pequena, a distância entre os pontos, no momento da detecção, é bem menor, quando comparada ao que ocorre no primeiro caso. Essa distância pode ser vista na Fig.29

A distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ durante toda a simulação é mostrada na Fig.30. Novamente, os pontos em preto representam essa distribuição antes da falta, enquanto os pontos em vermelho representam a distribuição após a incidência da falta.

Após a detecção o transitório, o algoritmo conseguiu classificar o evento como uma

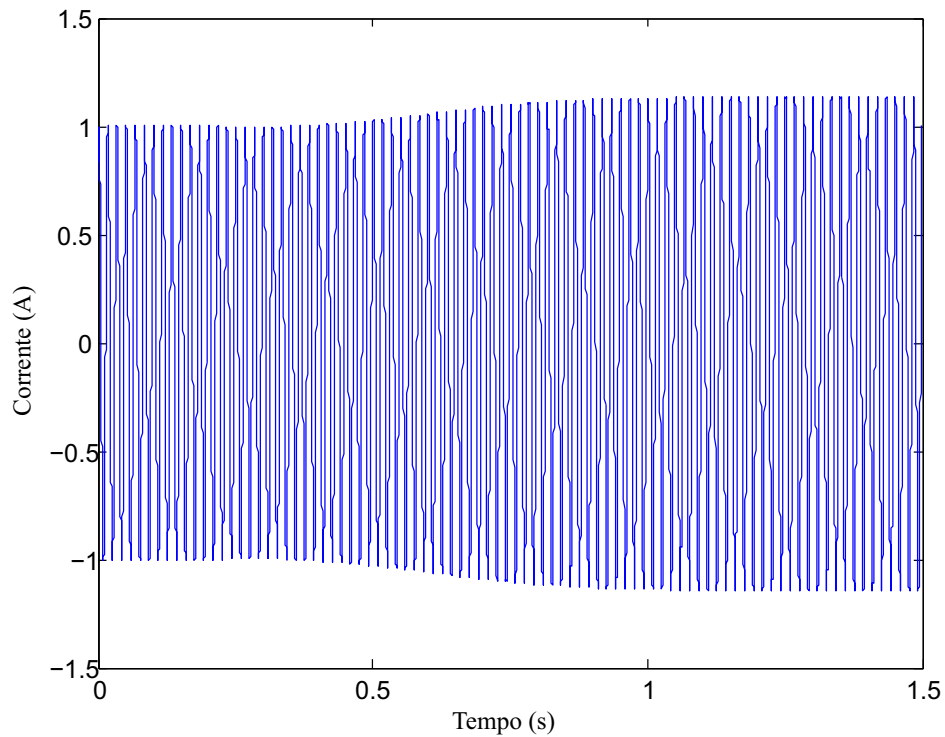


Figura 27 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 2.

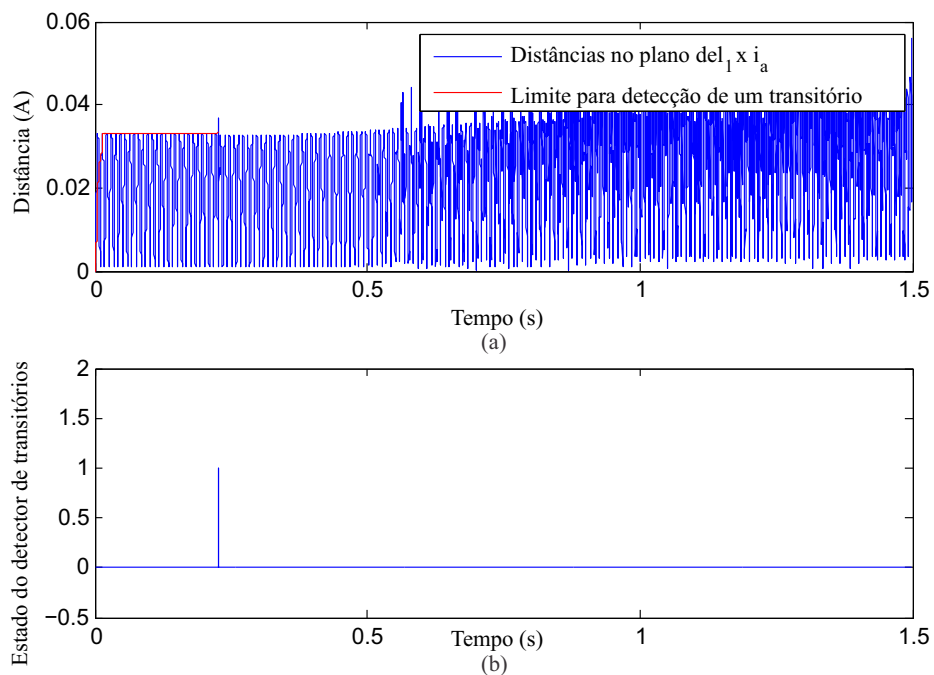


Figura 28 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.

falta de alta impedância pela característica de *buildup* da corrente, da mesma forma que foi descrita para o caso anterior. A característica da envoltória, bem como os pontos de detecção, podem ser vistos na Fig.31

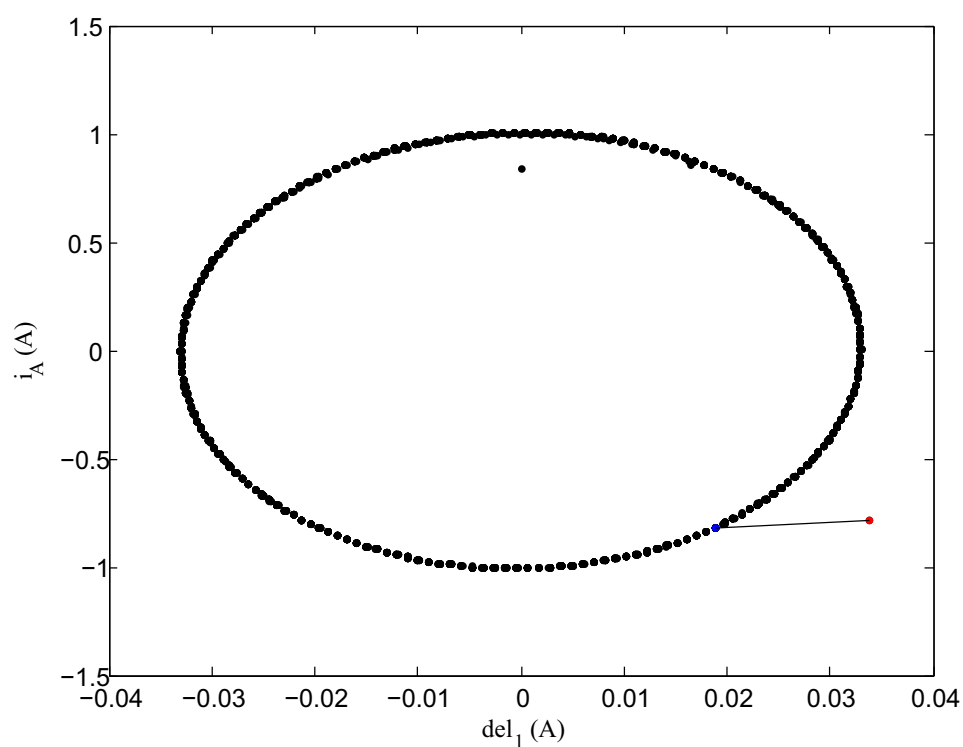


Figura 29 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.

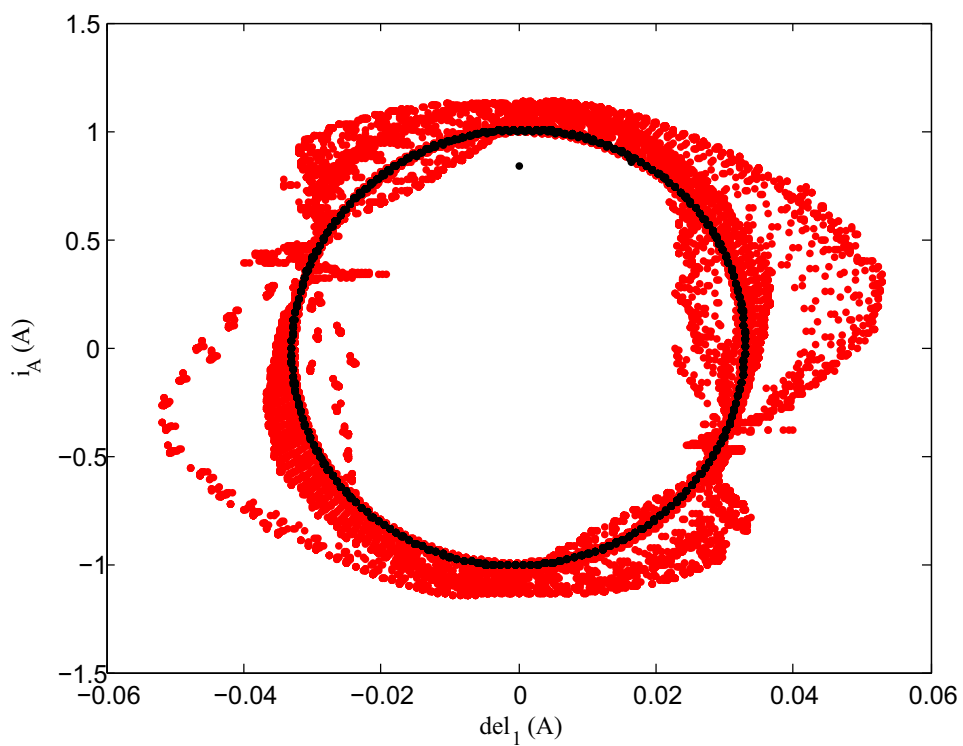


Figura 30 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.

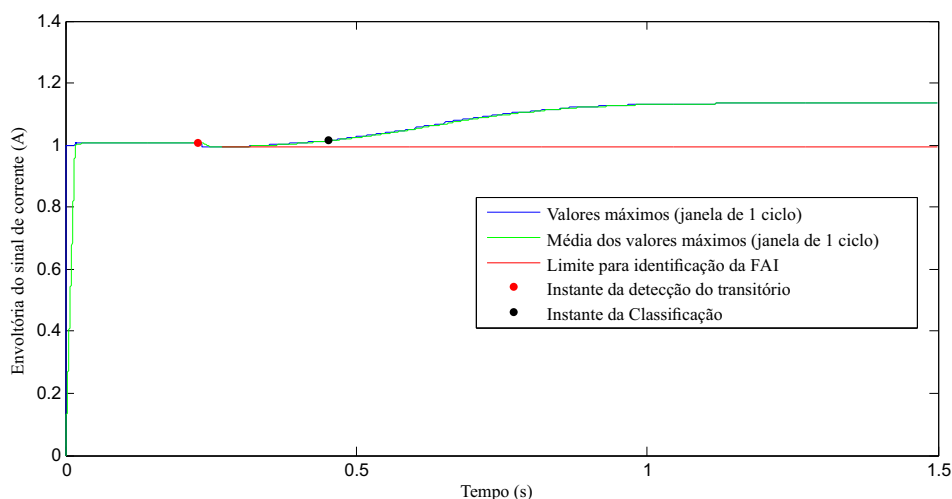


Figura 31 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.

4.7 Caso 3 - Entrada de Carga no Segundo Alimentador

O terceiro caso descrito representa uma entrada da carga no ponto 4 do sistema teste, ocorrida no instante de 0,22s. É importante analisar esse caso, pois, com o chaveamento da carga, a corrente sofre uma variação de amplitude, isso faz com que seja detectado um transitório, colocando a prova o classificador de faltas de alta impedância. Na Fig.32, é possível observar o aumento na amplitude da corrente no instante em que a carga é chaveada.

Essa elevação na amplitude caracteriza um transitório, o qual é detectado conforme mostra a Fig.33. Porém, depois dessa variação, a distribuição dos pontos retorna a uma trajetória definida, diferentemente dos casos de falta de alta impedância. Essa distribuição pode ser vista na Fig.34.

Já que, após o transitório, não foram satisfeitas as características que envolvem uma falta de alta impedância, essa classificação não aconteceu. Isso pode ser visto na Fig.35, a qual mostra que o detector não reconheceu tal transitório como uma FAI.

4.8 Caso 4 - Saída de Carga no Segundo Alimentador

De forma oposta ao caso 3, este caso representa uma saída da carga no ponto 4 do sistema. O detalhamento deste caso é interessante, pois nele ocorre uma situação diferente das demais, onde não é detectado nenhum transitório. Embora haja uma redução na amplitude da corrente do alimentador, como pode ser visto na Fig.36, o detector de transitórios, cuja atuação é mostrada na Fig.37, não identifica a ocorrência do evento. Dessa forma, o algoritmo que identifica a FAI não atua.

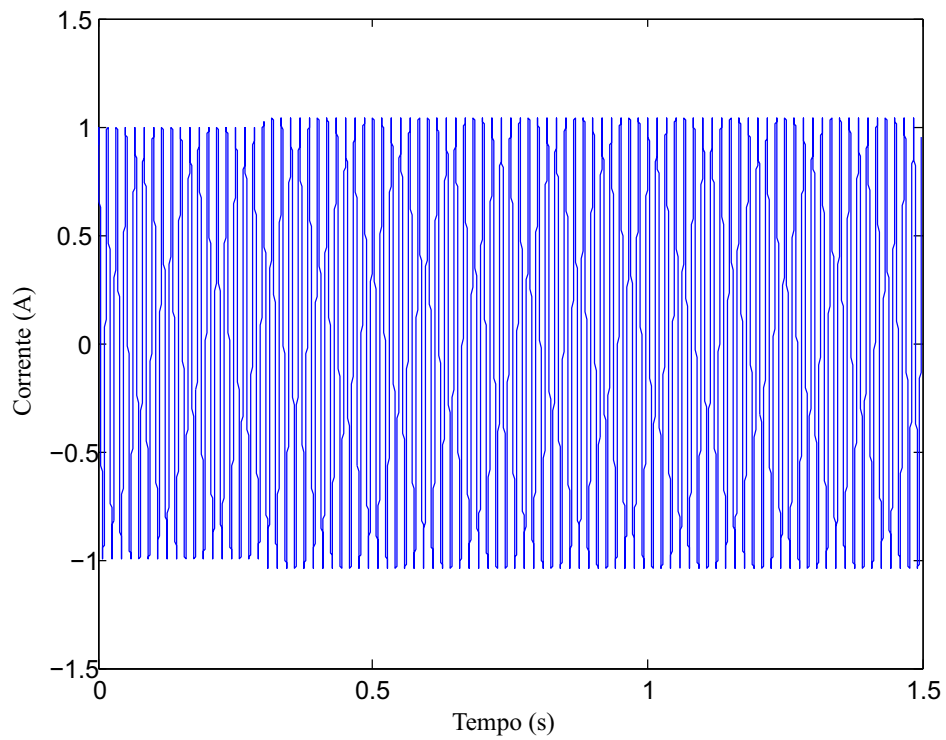


Figura 32 – Forma de onda da corrente resultante da entrada de carga para o Caso 3.

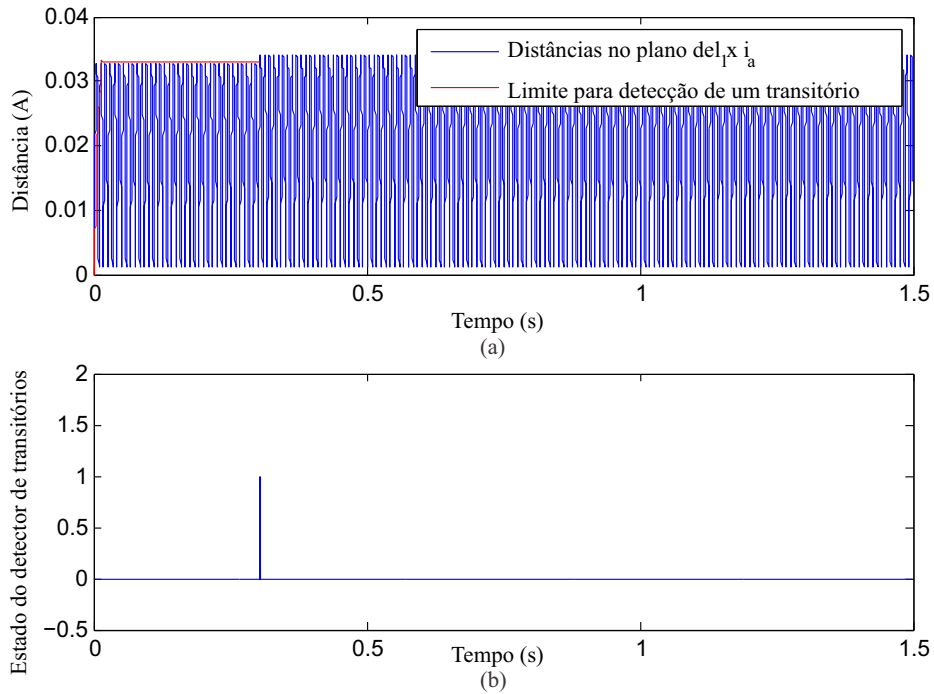


Figura 33 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.

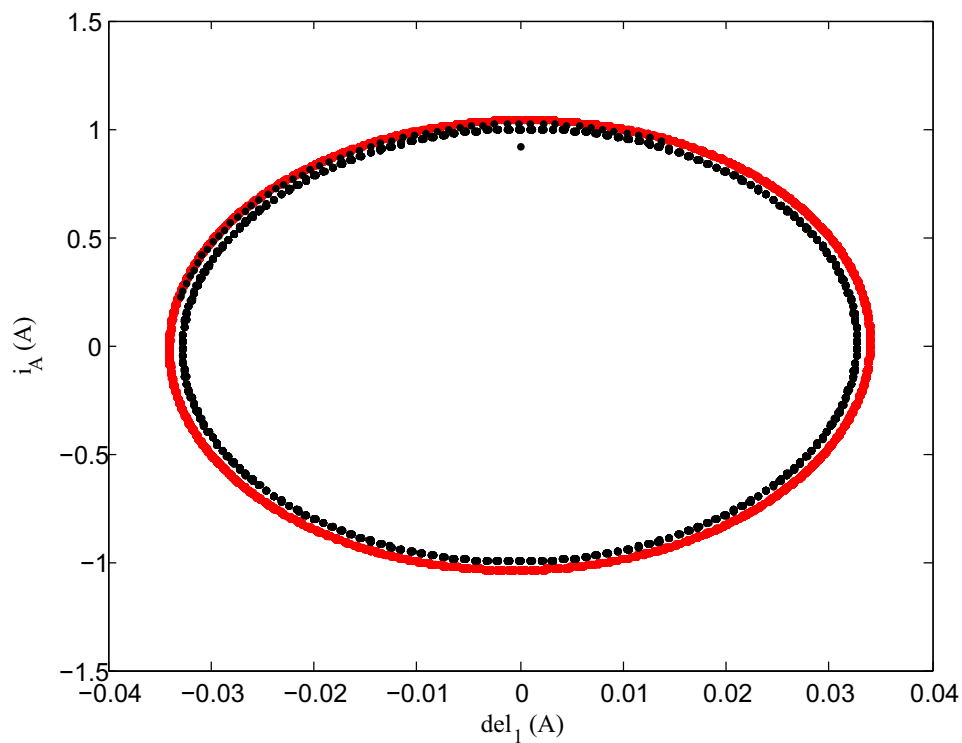


Figura 34 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.

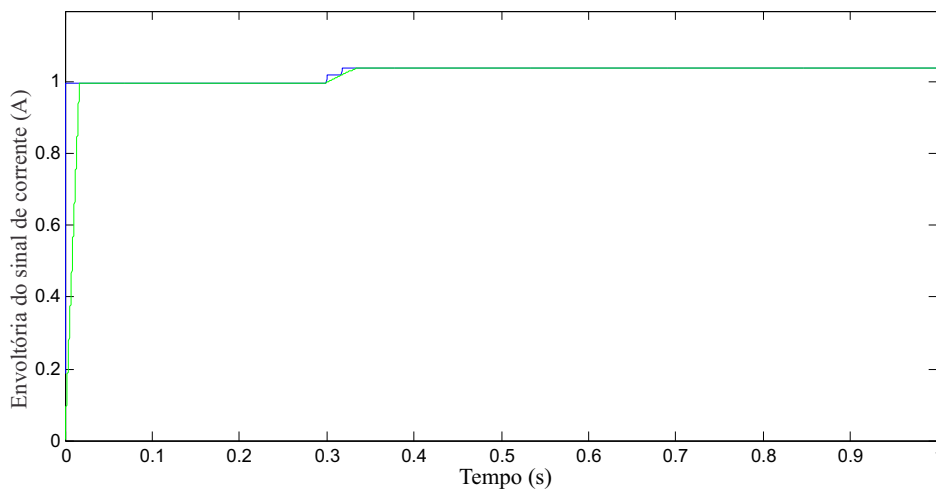


Figura 35 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.

4.9 Considerações Finais

O sistema teste e o modelo computacional utilizado para simulação das características das faltas de alta impedância, os quais foram simulados no *EMTP/ATP*, foram apresentados e descritos neste Capítulo. Essas simulações proveram sinais semelhantes às medições reais encontradas na literatura para este tipo de evento.

No total foram gerados dezesseis casos de simulações e em todos eles o algoritmo

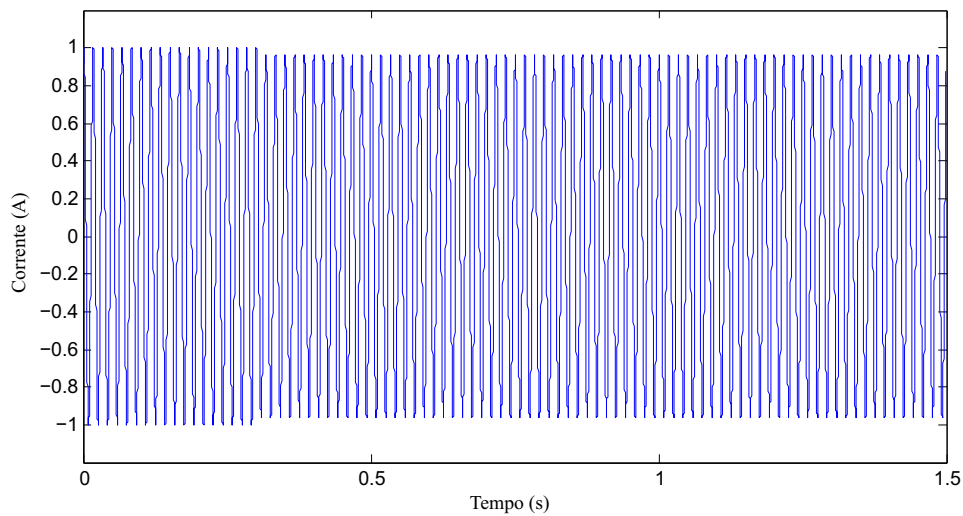


Figura 36 – Corrente resultante no segundo alimentador devido à saída da carga do ponto 4 do sistema teste.

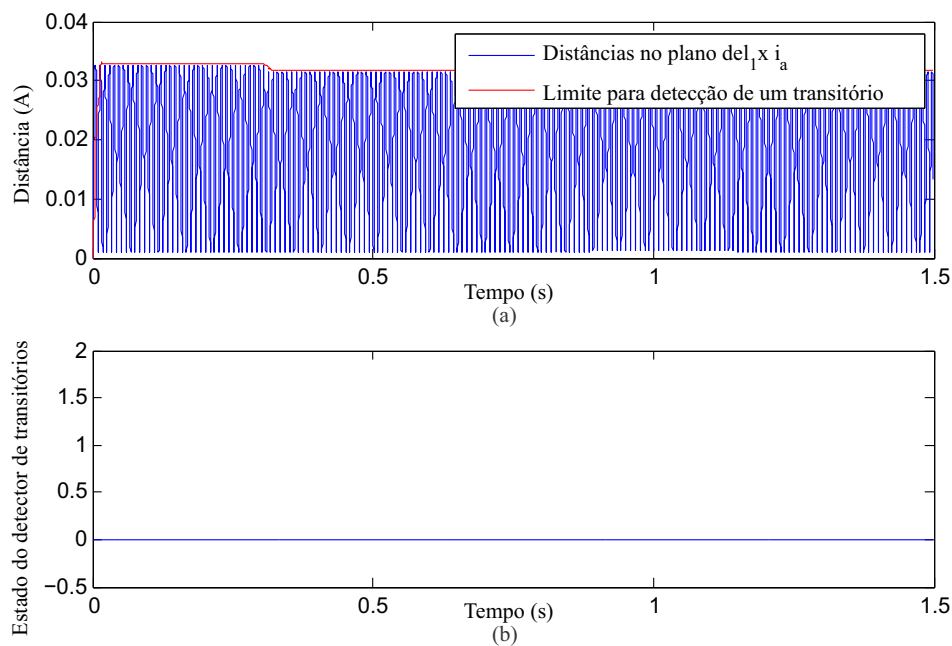


Figura 37 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.

conseguiu atuar de forma correta. Porém, devido à semelhança entre os resultados, foram detalhados apenas quatro desses casos. Os demais resultados obtidos durante os testes podem ser vistos na Tabela 3 do Apêndice A, a qual apresenta os instantes de detecção e classificação de cada evento.

5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem geral sobre temas relacionados às faltas de alta impedância, dando ao leitor uma boa noção do assunto, ressaltando as causas, consequências, características, dificuldades e métodos existentes para simulação e classificação dessas faltas.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica, principalmente os sistemas aéreos, estão sujeitos à ocorrência de eventos transitórios. Esses transitórios podem ser normais do sistema, como os ocorridos devido ao chaveamento de cargas e energização de máquinas, ou inesperados, tais como os que ocorrem em consequência das descargas atmosféricas, faltas e falhas de equipamentos. Frente a isso, faz-se necessária uma proteção robusta para esses sistemas que permita salvaguardar os equipamentos e contribuir para a continuidade do serviço de distribuição. As FAIs se destacam dentre os transitórios possíveis pois ainda não existe um método de proteção contra FAIs que seja confiável e viável para implementar em todo o sistema. Como apresentado, os dispositivos de proteção convencionais dos sistemas de distribuição não conseguem detectar as FAIs, por terem seu funcionamento visando sempre uma sobrecorrente. Dentre os métodos existentes, os que utilizam sensores com comunicação via rádio, demonstraram um bom desempenho. No entanto, seu alto custo de implementação torna impraticável sua instalação em larga escala. Diante disso, as técnicas que vêm se destacando são as que se baseiam em grandezas medidas na própria subestação. O inconveniente disso é que a maioria dos métodos fazem a detecção pelo conteúdo harmônico gerado pelo arco elétrico, o que pode levar a uma falsa detecção na ocorrência de transitórios comuns do sistema ou até mesmo na conexão de inversores e equipamentos eletrônicos à rede.

A técnica para detecção de FAIs proposta tem o diferencial de fazer a detecção pela característica de *buildup* da corrente da fase em que ocorre a falta. Essa característica acontece sempre após ocorrer uma queda na amplitude dessa corrente. Sendo assim, o algoritmo proposto somente verifica se existe uma FAI quando um transitório for detectado. Isso elimina boa parte da chance de ocorrer uma atuação indevida frente às características comuns das cargas instaladas no sistema. Outra vantagem é que o método é auto ajustável, ou seja, adapta-se a qualquer amplitude de corrente, o que dispensa determinar um valor de ajuste para cada variação da potência instalada da rede em questão.

Tanto o sistema teste como o modelo computacional para simulação de faltas de

alta impedância, encontrados na literatura e desenvolvidos nesse trabalho, representam fielmente as características e comportamentos existentes em uma FAI, apresentando excelentes resultados quando comparado à registros reais da ocorrência desses eventos. Sendo assim, o algoritmo proposto pôde ser testado e ter seu funcionamento comprovado, pois, para todos os quatorze casos de FAIs que foram simulados, o algoritmo conseguiu detectar e classificar essas FAIs corretamente. Os casos analisados compreenderam pontos específicos do sistema teste, além de incluir um trecho distante do alimentador com uma pequena carga conectada, diferentes valores de resistência de falta e variados instantes de tempo para a incidência de falta. Ainda, foram simulados dois casos para testar o algoritmo em situações transitórias nas quais a metodologia pudesse vir a atuar indevidamente. O primeiro caso verifica a situação de entrada de uma carga, consideravelmente grande, enquanto o segundo simula a saída dessa mesma carga. Nessas duas condições, o algoritmo também atuou corretamente, não classificando esses transitórios como FAI.

Logo, como o algoritmo demonstrou desempenho satisfatório, possui grande potencial para ser implementado em lógicas internas de relés digitais, contribuindo na proteção e segurança do sistema de distribuição de energia elétrica, para situações de falta de alta impedância.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões de trabalhos futuros são as que seguem:

- Desenvolver um localizador de faltas de alta impedância;
- Verificar o desempenho da técnica fazendo uso de dados de um alimentador real;
- Comparar a metodologia proposta com outras já existentes;
- Verificar o desempenho da metodologia proposta frente à condições de chaveamento de transformadores e banco de capacitores;
- Analisar o comportamento da metodologia proposta com faltas de alta impedância ocorridas no lado da carga.

Referências

- AUCOIN, B. M.; JONES, R. H. High impedance fault detection implementation issues. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 139–148, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 23.
- BRUMATTI, M. Redes neurais artificiais. *Vitória, Espírito Santo, ca*, 2005. Citado na página 19.
- DARWISH, H. A.; ELKALASHY, N. I. Universal arc representation using emtp. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 772–779, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- DISTRIBUIÇÃO, E. C. de. *Proteção de sistemas aéreos de distribuição*. [S.l.]: Campus, 1982. Citado na página 26.
- ELDIN, A. H.; ABDALLAH, E.; MOHAMED, N. Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks using discrete wavelet transform. *IET*, 2013. Citado na página 19.
- ELKALASHY, N. I.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H. A.; IZZULARAB, M. A.; TAALAB, A.-M. Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 375–383, 2007. Citado na página 17.
- EMANUEL, A.; CYGANOSKI, D.; ORR, J.; SHILLER, S.; GULACHENSKI, E. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kv distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 676–686, 1990. Citado na página 24.
- FARIAS, P. E. Detecção e classificação de transitórios em redes de distribuição para identificação de faltas de alta impedância. 2013. Citado 5 vezes nas páginas 10, 19, 22, 24 e 38.
- KIZILCAY, M.; SETA, P. L. Digital simulation of fault arcs in medium-voltage distribution networks. *15th PSCC, Liege*, p. 22–26, 2005. Citado na página 16.
- MARTINHO, E. Distúrbios da energia elétrica. *Editora Erica*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- MICHALIK, M.; REBIZANT, W.; LUKOWICZ, M.; LEE, S.-J.; KANG, S.-H. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1793–1802, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 10, 19, 29 e 30.
- NAKAGOMI, R. M. *Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. Citado 9 vezes nas páginas 10, 16, 23, 24, 25, 39, 40, 41 e 42.

- NETO, R. de A. P. *Sistemas para detecção de faltas de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 10, 30 e 31.
- OLIVEIRA, H. de; FALK, T.; TÁVORA, R. Decomposição de wavelets sobre corpos finitos. *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, v. 17, n. 1, p. 38–47, 2002. Citado na página 18.
- SANTOS, E. M. dos. Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção. 2011. Citado na página 33.
- SEDIGHI, A. A new model for high impedance fault in electrical distribution systems. 2014. Citado na página 18.
- SHEBL, K. M.; BADRAN, E. A.; ABDALLA, E. A combined models-tacs atpdraw general model of the high impedance faults in distribution networks. *MEPCON*, v. 10, p. 19–21, 2010. Citado na página 18.
- TORRES, G.; RUIZ, P. et al. High impedance fault detection using discrete wavelet transform. In: IEEE. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 2011 IEEE*. [S.l.], 2011. p. 325–329. Citado 5 vezes nas páginas 10, 19, 27, 28 e 29.
- VIJAYACHANDRAN, G.; MATHEW, B. High impedance arcing fault detection in mv networks using discrete wavelet transform and artificial neural networks. In: IEEE. *Green Technologies (ICGT), 2012 International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 089–098. Citado na página 19.
- WESTER, C. G. High impedance fault detection on distribution systems. In: IEEE. *Rural Electric Power Conference, 1998. Papers Presented at the 42nd Annual Conference*. [S.l.], 1998. p. c5–1. Citado na página 22.

Apêndices

APÊNDICE A – Resultados Obtidos

Tabela 3 – Resultados obtidos.

Caso	Ocorrência do transit. (s)	Deteção do transit. (s)	Classificação da FAI (s)
FAI Barra 1 ($R_{FALTA}=250\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 2 ($R_{FALTA}=250\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 2 ($R_{FALTA}=100\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 2 ($R_{FALTA}=350\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 2 ($R_{FALTA}=450\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 3 ($R_{FALTA}=250\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 4 ($R_{FALTA}=250\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 5 ($R_{FALTA}=250\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
FAI Barra 6 ($R_{FALTA}=250\Omega$)	0,22	0,22822	0,45133
Entrada da carga da barra 4	0,3	0,30479	NADA ACONTECE
Saída da carga da barra 4	0,3	NADA ACONTECE	NADA ACONTECE
FAI Barra 3 ocorrida no pico da tensão	0,2168	0,22502	0,44813
FAI Barra 3 ocorrida no zero da tensão	0,2208	0,22902	0,45213