

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HENRIQUE STEIN

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA
ENVOLVENDO A RUPTURA DO CONDUTOR**

**Alegrete
Dezembro de 2019**

HENRIQUE STEIN

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA
ENVOLVENDO A RUPTURA DO CONDUTOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete
Dezembro de 2019

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) .

S819n Stein, Henrique

Uma Nova Proposta para Detecção de Faltas de Alta
Impedância Envolvendo a Ruptura do Condutor / Henrique Stein.
94 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2019.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Arco Elétrico. 2. Faltas de Alta Impedância. 3. Sistema
Elétrico de Potência. 4. Transitórios. I. Título.

Henrique Stein

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE
FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ENVOLVENDO A
RUPTURA DO CONDUTOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia

Dissertação defendida e aprovada em: Alegrete, 13 de dezembro de 2019.

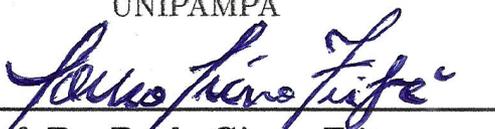
Banca examinadora:



**Prof. Dr. Eduardo Machado dos
Santos**

Orientador

Universidade Federal do Pampa -
UNIPAMPA



Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTFPR



**Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da
Silva**

Universidade Federal do Pampa -
UNIPAMPA

Este trabalho é dedicado a todos os grupos de pesquisa da nossa UNIPAMPA, em especial, ao Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade, à minha família pelo apoio, aos professores pelo ensino e agradeço muito ao meu orientador que nunca mediu esforços em ajudar e incentivar desde os tempos da graduação. Muito obrigado a todos!

*"Alguns confiam em carros
e outros em cavalos, mas nós
confiamos no Nome do Senhor, o nosso Deus."
(Salmos 20:7)*

RESUMO

As redes aéreas de distribuição de energia elétrica são sujeitas à ações de natureza climática, humana e animal. Essas ações podem causar a interrupção do fornecimento de energia pela atuação do sistema de proteção. Nesse contexto, as proteções convencionais atuam sempre que detectam uma sobrecorrente ou um surto de tensão no sistema, os quais podem ser causados por um curto-circuito, por fuga de corrente em isoladores ou por excesso de carga, entre outros fatores. Porém, existem situações em que esses dispositivos convencionais não atuam. Uma delas ocorre, por exemplo, 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). Nesse tipo de falta, a corrente elétrica resultante, dependendo do terreno, pode alcançar valores próximos aos nominais, fazendo com que os dispositivos de proteção não sejam sensibilizados. 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 realizados para desenvolver metodologias capazes de detectar as FAIs. Entretanto, ainda não existe nenhum método robusto e suficiente para 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 de FAIs que utiliza apenas os valores de corrente amostrados na subestação de energia, a qual conta com um detector de transitórios que, por sua vez, serve como gatilho para o processo de identificação da fase de *buildup*, característica exclusiva das formas de onda das correntes neste tipo de falta. O algoritmo proposto foi implementado no ambiente MATLAB[®] e testado com base em simulações realizadas no software *EMTP-ATP* para obtenção dos sinais de corrente utilizando modelos computacionais de simulação de FAIs encontrados na literatura. Para fins de comparação e comprovação da eficácia do método proposto, este teve sua resposta comparada com aquela obtida através de uma metodologia fundamentada na análise da corrente de sequência negativa da rede para diferentes situações de falta. Os resultados obtidos demonstram que a técnica proposta é robusta e eficaz para detecção de FAIs, uma vez que a mesma classificou corretamente a ocorrência de faltas de alta impedância na grande maioria dos casos analisados e não atuou falsamente diante de eventos transitórios comuns ao sistema, tais como energização de transformadores e chaveamento de banco de capacitores, entrada e saída de cargas.

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

ABSTRACT

Overhead lines of the power distribution networks are subject to climate, human and animal actions. These actions may cause the power supply to be interrupted by the protection system acting. In this context, conventional protections act whenever they detect an overcurrent or a voltage surge in the system, which may be caused by a short circuit, leakage current in isolators or overcharge, among other factors. However, there are situations where these conventional devices do not work. One of these occurs, for example, when a conductor of the primary network breaks and comes into contact with a surface that has a high electrical resistance. This event is called High Impedance Fault (HIF). In this type of fault, the resulting electric current, depending on the terrain, can reach values close to the nominal, so that the protection devices are not sensitized. This problem is very important as the fallen driver remains energized, endangering the lives of people and animals passing by. Given this, many studies are being conducted to develop methodologies capable of detecting the HIFs. However, there is no robust method yet to detect high impedance faults under all possible operating conditions. In addition, most existing methodologies are economically unviable for large scale deployment. Thus, this work proposes a new technique for detecting FAIs that uses only the current values sampled at the power substation, which has a transient detector that, in turn, serves as a trigger for the phase identification process. of *buildup*, a unique feature of current waveforms in this fault type. The proposed algorithm was implemented in the MATLAB[®] environment and tested based on simulations performed in the EMTP-ATP software to obtain current signals using computer simulations of FAIs found in the literature. For purposes of comparison and proving the effectiveness of the proposed method, its response was compared to that obtained through a methodology based on the analysis of the negative sequence current of the network for different fault situations. The results show that the proposed technique is robust and effective for detecting FAIs, since it correctly classified the occurrence of high impedance faults in the vast majority of cases analyzed and did not act falsely in the event of transient events common to the system, such as as transformer energization and capacitor bank switching, input and output of loads.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de resistências variável controlada por TACS.	23
Figura 2 – Modelo de arco Emanuel.	24
Figura 3 – Característica de um transitório oscilatório.	30
Figura 4 – Forma de onda da corrente típica de uma FAI.	32
Figura 5 – Fase de <i>buildup</i> e detalhes dos <i>shoulders</i>	34
Figura 6 – Chave fusível de distribuição.	35
Figura 7 – Religador automático de distribuição.	35
Figura 8 – Seccionador automático de distribuição.	36
Figura 9 – Exemplo de disjuntor de média tensão.	37
Figura 10 – Decomposições da TWD na fase em falta do alimentador.	38
Figura 11 – Decomposição D3 de todas as fases do alimentador.	38
Figura 12 – Somatório do valor absoluto da decomposição D3 para todas as fases do alimentador.	39
Figura 13 – Defasagem entre os coeficientes da TWC (CWCs) da tensão e corrente de sequência zero da fase em falta e de uma fase em condições normais.	40
Figura 14 – Sensor de corrente com comunicação via rádio.	40
Figura 15 – Isolador de ancoragem com o extensômetro.	41
Figura 16 – Plano formado por del_1 e i_a antes da ocorrência do transitório.	44
Figura 17 – Plano formado por del_1 e i_a no momento em que ocorre o transitório.	44
Figura 18 – Exemplo do detector de transitório.	45
Figura 19 – Fluxograma da metodologia proposta.	47
Figura 20 – Exemplo de detecção do método da corrente de sequência negativa.	49
Figura 21 – Sistema teste utilizado para validar o algoritmo.	52
Figura 22 – Modelo computacional para simulação de FAIs.	53
Figura 23 – Característica $V \times I$ para falta de alta impedância.	54
Figura 24 – Curva $V \times I$ de da falta de alta impedância com valores em p.u.	55
Figura 25 – Forma de onda da corrente no ponto de ocorrência da falta de alta impedância.	56
Figura 26 – Detalhe das distorções características do sinal de corrente para uma FAI.	56
Figura 27 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 1.	58
Figura 28 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	58
Figura 29 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.	59
Figura 30 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.	59
Figura 31 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.	60
Figura 32 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 2.	61

Figura 33 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.	62
Figura 34 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	62
Figura 35 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.	63
Figura 36 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.	63
Figura 37 – Forma de onda da corrente resultante da entrada de carga para o Caso 3.	64
Figura 38 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	64
Figura 39 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.	65
Figura 40 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.	65
Figura 41 – Corrente resultante no segundo alimentador devido à saída da carga do ponto 4 do sistema teste.	66
Figura 42 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	66
Figura 43 – Forma de onda da corrente resultante do curto-circuito monofásico do quinto caso.	67
Figura 44 – Atuação do detector de transitórios para um curto-circuito monofásico. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	67
Figura 45 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência do curto-circuito monofásico no quinto caso.	68
Figura 46 – Atuação do detector de transitórios para o caso de energização de um transformador. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	69
Figura 47 – Detector da envoltória do sinal de corrente no caso de energização de um transformador.	69
Figura 48 – Atuação do detector de transitórios para o caso de chaveamento de banco de capacitor. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.	70
Figura 49 – Detector da envoltória do sinal de corrente para o caso de chaveamento de banco de capacitor.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de corrente de faltas de alta impedância.	31
Tabela 2 – Valores de impedância acumulados por trecho.	52
Tabela 3 – Resultados obtidos.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CESP	Companhia Energética de São Paulo
CWC	Coefficiente Wavelet Contínuo
EMPT ATP	Eletromagnetic Transients Program
FAI	Falta de Alta Impedância
GRNN	Generalized Regression Neural Network
KEPCO	Korea Electric Power Corporation
MM	Morfologia Matemática
PLL	Phase Locked Loop
RNA	Rede Neural Artificial
TACS	Transient Analysis of Control Systems
TC	Transformador de Corrente
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWC	Transformada Wavelet Contínua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Considerações Gerais	21
1.2	Objetivos	21
1.3	Motivação	22
1.4	Estado-da-Arte	22
1.4.1	Sistemas e modelos para simulação do arco elétrico	22
1.4.2	Classificação de faltas de alta impedância	25
1.5	Estrutura do Trabalho	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Considerações Gerais	29
2.2	Transitórios em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	29
2.2.1	Energização de Transformadores	30
2.2.2	Chaveamento de Banco de Capacitores	30
2.3	Faltas de Alta Impedância	31
2.4	Dispositivos de Proteção em Redes Aéreas de distribuição	33
2.4.1	Chaves-fusíveis	34
2.4.2	Religador Automático	35
2.4.3	Seccionador Automático	36
2.4.4	Relés com Disjuntores	36
2.5	Métodos Existentes para a detecção de FAIs	37
2.6	Considerações Finais	41
3	TÉCNICA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FAIS	43
3.1	Considerações Gerais	43
3.2	Detecção de Transitórios	43
3.3	Classificação de FAIs	45
3.4	TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FAIS PELA CORRENTE DE SEQUÊN- CIA NEGATIVA	46
3.5	Considerações Finais	48
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	51
4.1	Considerações Gerais	51
4.2	Sistema Teste	51
4.3	Modelo Computacional Utilizado para Simulação da FAI	52
4.3.1	Controle da Resistência HZR1	53
4.3.2	Controle da Resistência HZR2	54
4.4	Resultados	55

4.4.1	Caso 1 - FAI no Ponto 2 do Sistema Teste	57
4.4.2	Caso 2 - FAI no Ponto 6 do Sistema Teste	60
4.4.3	Caso 3 - Entrada de Carga no Segundo Alimentador	61
4.4.4	Caso 4 - Saída de Carga no Segundo Alimentador	62
4.4.5	Caso 5 - Curto-circuito Monofásico no Ponto 5 do Sistema Teste	64
4.4.6	Caso 6 - Energização de um Transformador	67
4.4.7	Caso 7 - Chaveamento de Banco de Capacitores	68
4.5	Comparativo da Técnica Proposta com a Técnica da Corrente de Sequência Negativa	70
4.6	Considerações Finais	71
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	73
5.1	Conclusões	73
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	74
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICES	79
	APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS	81

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. Há também outras condições inesperadas oriundas de 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 objetivo principal deste trabalho é apresentar uma nova proposta para a detecção de FAIs que envolvam o rompimento do condutor, a qual é fundamentada na caracterização da fase de *buildup* existente na forma de onda dos sinais de corrente oriundos deste tipo de falta. Como objetivos específicos, citam-se:

- Realizar revisão bibliográfica acerca do tema e das técnicas propostas para detecção das FAIs;
- Implementar um sistema teste, incluindo um modelo de arco elétrico, para a simulação de FAIs em diferentes condições operacionais da rede, bem como outros transitórios elétricos, formando, assim, um banco de dados com diferentes sinais de corrente;
- Desenvolver e implementar uma nova técnica e testá-la para o processamento dos sinais do banco de dados;
- Comparar os resultados obtidos pela técnica proposta com aqueles obtidos segundo a análise da corrente de sequência negativa da rede; e
- Validar a atuação do método proposto, comprovando sua eficácia frente aos diferentes casos analisados.

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

Um modelo computacional que utiliza resistência variável controlada por TACS e que reproduz as características das faltas de alta impedância em casos de rompimentos de condutores primários em redes de média tensão foi implementada no software ATP por Nam et al. (2001). Tal modelo foi desenvolvido com base nas características do sinal de corrente provenientes de um ensaio em um alimentador real da empresa Korea Electric Power Corporation (KEPCO).

Sendo assim, 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.

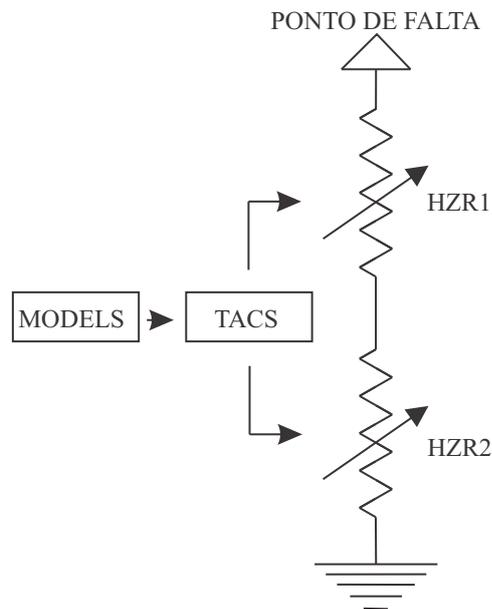
Para isso, foi utilizada uma modelagem matemática feita por Darwish e Elkalashy (2005), na qual o arco é descrito por uma equação diferencial de primeira ordem, dada por (1.1), onde τ é uma constante de tempo, G é a condutância estacionária e g é a condutância variável. O

arco foi representado por um bloco criado através da função MODELS no software *EMTP-ATP*. 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.

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

Baseado no trabalho de Nam et al. (2001), um modelo de representação da instabilidade do arco elétrico que possui duas resistências variáveis controladas por TACS foi desenvolvido no trabalho de Nakagomi (2006). Nesse modelo, a simulação do arco elétrico é feita por meio de um gerador de sinais randômicos, também utilizando a função MODELS do *EMTP-ATP*. 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 Figura 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 do 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 provenientes das simulações se mostraram bastante similares aos obtidos em campo.

Figura 1 – Modelo de resistências variável controlada por TACS.



Fonte: Autor.

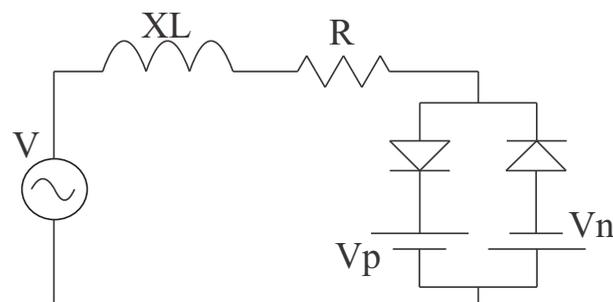
No trabalho de Elkalashy et al. (2007), uma falta de alta impedância ocorrida devido à inclinação de uma árvore sobre uma rede de média tensão, foi modelada e verificada experimentalmente. A modelagem foi baseada em equações térmicas, utilizando o modelo de arco universal visto em Darwish e Elkalashy (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 $200\text{ k}\Omega$. 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, Badran e Abdalla (2010) também sugeriram uma combinação entre MODELS e TACS em *EMTP-ATP* 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 de Emanuel et al. (1990), o qual possui diodos e fontes de corrente contínuas ligados em anti-paralelo e pode ser visto na Figura 2. Essa proposta foi simulada em *EMTP-ATP* 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 20 kV e 8 km 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.



Fonte: Autor.

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, Falk e Távora (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, tendo demonstrado superioridade em relação à Transformada de Fourier.

De acordo com Brumatti (2005), as Redes Neurais Artificiais (RNAs) 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 RNAs 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 no *EMTP-ATP* um modelo de rede de distribuição, no qual foram simuladas faltas de alta impedância em diversos pontos da rede.

Além disso, Torres e Ruiz (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 *EMTP-ATP*, 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, Abdallah e Mohamed (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. No referido trabalho, 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.

O trabalho de Farias (2013) apresenta métodos para detecção e classificação de tran-

sitórios, 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.

Um método de classificação de FAIs que observa a corrente de sequência negativa a as assinaturas nela referenciadas é proposto por Oliveira (2013). Para tanto, o autor desenvolveu um algoritmo que usa como entrada as leituras dos TCs do alimentador e monitora esses sinais de corrente. Toda vez que um valor limite da corrente de sequência negativa é ultrapassado, fica caracterizada uma FAI. Todavia, há a necessidade do conhecimento prévio das características das cargas conectadas ao alimentador e das correntes de desbalanço do mesmo para determinação do valor limite.

Gautam e Brahma (2012) e Kavi, Mishra e Vilathgamuwa (2018) desenvolveram algoritmos para detecção de FAIs que utilizam técnicas de Morfologia Matemática (MM) para identificação desse tipo de evento. O primeiro utiliza a técnica em conjunto com um relé convencional de sobrecorrente e utiliza os Software PSCAD para simulação e geração dos sinais. O segundo busca identificar as não linearidades da FAIs utilizando MM e usa o sistema IEEE 13 barras para testar seu algoritmo.

Recentemente Vieira et al. (2018) publicaram uma nova técnica para detecção e localização de FAIs, também no ambiente *MATLAB/Simulink*[®], que propõe a detecção e localização desse tipo de falta a partir da análise do desequilíbrio das tensões, monitorando as componentes de sequência negativa ou sequência zero. A técnica contaria com a instalação de medidores inteligentes instalados junto aos transformadores de distribuição. Nesse caso, quando o desbalanço entre fases em alguma medição atinge um valor predeterminado, uma FAI é então detectada. Os dados dos medidores próximos são enviados para um centro de operações onde um algoritmo analisa o desbalanço de todos esses medidores inteligentes e selecionam um possível trecho de ocorrência da falta.

1.5 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, é descrita a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento desse trabalho, onde 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, a técnica implementada para comparação de desempenhos 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

Uma falta é caracterizada como um fenômeno acidental 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 cobrados às concessionárias, faz-se necessário um investimento cada vez maior no que diz respeito à proteção desses sistemas. Nos últimos anos, muitos estudos e estratégias vêm 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 para qual ainda não se tem uma solução prática, que é a falta de alta impedância. Esta, por sua vez, não causa sobrecorrente, sendo de difícil detecção pelo relé de neutro, pois, o grande número de ramais monofásicos existentes, leva o ajuste desses equipamentos próximo aos 30% da corrente de carga máxima.

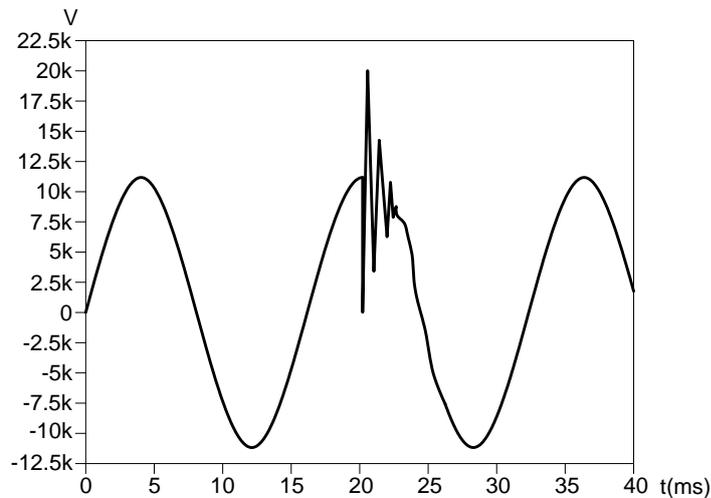
Nesse contexto, o presente Capítulo aborda os temas que servem como base para o entendimento desse trabalho. Na primeira Seção, é feita uma introdução sobre os tipos de transitórios que mais ocorrem em sistemas de distribuição. A segunda Seção traz um detalhamento sobre FAIs, como são causadas, quais são as características e porque são difíceis de serem detectadas. Já, na terceira Seção, de forma resumida, são discutidos 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 das FAIs 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, distorções das formas de onda, flutuação de tensão e variação de frequência. Destaca-se, ainda, que os transitórios podem ser divididos em, transitório impulsivo e transitório oscilatório. O primeiro acontece na ocorrência de uma ou mais descargas atmosféricas, sendo este de curta duração, ocorrendo de forma unidirecional (negativa ou positivamente). Além disso, provoca sobreensões 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 Figura 3. Este é gerado por eventos comuns do sistema, tais como, energização de linhas, saída de cargas indutivas, chaveamento de bancos de capacitores, energização de transformadores ferromagnéticos, e até mesmo, pela eliminação de faltas (MARTINHO, 2009).

A energização de transformadores e o chaveamento de bancos de capacitores são considerados como transitórios do tipo oscilatório. Se a oscilação ocorrer com valores abaixo de 5 kHz e tempo de duração entre 0,3 e 50 ms, então este é denominado transitório oscilatório de baixa frequência, o qual é comumente encontrado nos sistemas de distribuição das concessionárias.

Figura 3 – Característica de um transitório oscilatório.



Fonte: Autor.

Já o transitório 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, pela abertura de disjuntores de subestações. Por fim, ressalta-se que o transitório oscilatório de alta frequência, que ocorre acima de 500 kHz, é causado por descargas atmosféricas (que provoca transitórios impulsivos e oscilatórios), chaveamento de cargas indutivas, entre outros (MARTINHO, 2009).

2.2.1 Energização de Transformadores

A corrente de excitação dos transformadores utilizados nos sistemas elétricos de potência, em regime permanente, varia de 0,5% a 2% da sua corrente nominal. Todavia, existe uma componente que pode aparecer durante a energização desses transformadores, conhecida como corrente de *inrush*, a qual pode provocar picos de corrente que ultrapassem vinte vezes o valor de pico da corrente nominal. Tal evento pode durar vários ciclos e gerar componentes de alta frequência (GUERRA; ARAÚJO; MEDEIROS, 2009).

2.2.2 Chaveamento de Banco de Capacitores

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica, é intenso o emprego de Banco de Capacitores (BCs) em derivação para compensação de energia reativa. A instalação destes promove benefícios ao sistema no que se refere ao alívio do carregamento dos componentes a montante, redução das perdas elétricas e melhorias nos níveis de tensão e do fator de potência. O chaveamento de BCs provoca sobretensões transitórias, no local da chave, que teoricamente pode alcançar o valor máximo de até 2,0 p.u. do valor nominal. Elevados transitórios de corrente podem também ocorrer, alcançando valores superiores a 10 vezes a corrente nominal do banco de capacitor e com duração de vários milissegundos (SANTOS, 2000).

2.3 Faltas de Alta Impedância

Uma falta de alta impedância acontece quando um condutor do circuito primário de uma rede aérea de distribuição de média tensão 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), as FAIs podem 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 pequena, 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.

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

Fonte: Aucoin e Jones (1996).

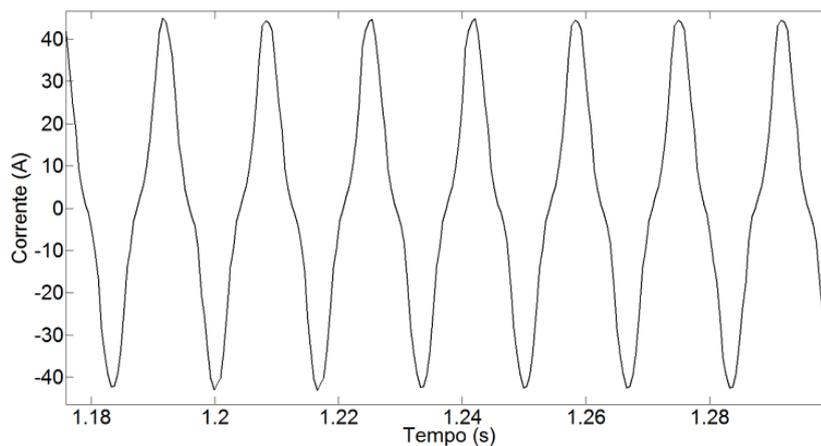
Essa característica de baixa amplitude de corrente é o que torna as FAIs um tipo de falta difícil de ser detectada e eliminada. Como as correntes apresentam valores próximos ou abaixo da corrente nominal de carga dos alimentadores, os dispositivos de proteção convencionais, como relés de sobrecorrente 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, então, envie uma equipe até o local. Esse tipo de situação é de extrema importância, pois, enquanto o condutor permanece energizado ao solo, este oferece 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, fizeram-se 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 úteis na sua detecção. Uma importante característica desse tipo de falta 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 são 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 Figura 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.



Fonte: 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 gerada 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).

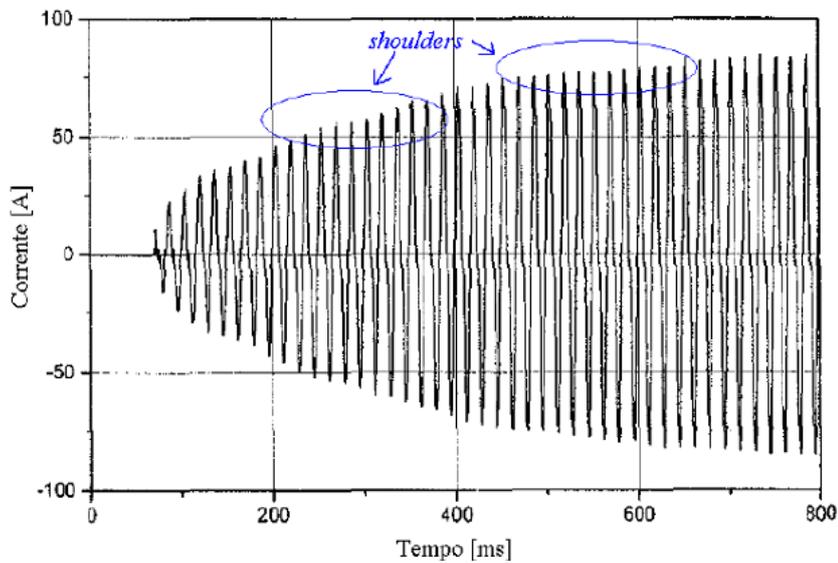
Essa variação de amplitude está relacionada à diversos fatores. Um deles é a acomodação do condutor ao solo. O outro, se dá pelo fato de que, quando o condutor entra em contato com a superfície, criam-se pequenos arcos. Com isso, há geração de calor e, conseqüentemente ocorre carbonização e vitrificação nos pontos de contato com o solo, criando um caminho de ionização, chamado fulgurito. Sendo assim, as regiões de centelhamento migram para os limites destes "caminhos", que vai alastrando-se e construindo 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 Companhia Energética de São Paulo (CESP) em 1985 na subestação de Conchas. Tal oscilografia pode ser observada na Figura 5. Nela, é possível ver de forma clara a fase de *buildup* e os trechos onde ocorrem os *shoulders*. Este ensaio foi realizado através do lançamento de um cabo energizado a partir de um veículo de manutenção de linhas vivas, o que foi repetido em vários pontos ao redor da subestação. Em todos os testes, a corrente de falta apresentou o mesmo tipo de comportamento.

Outra característica que vale observar, é que a natureza da falta de alta impedância é altamente resistiva, enquanto a maioria dos arcos elétrico tem características indutivas. Nas FAIs, o tamanho do arco e a intensidade da corrente são bem menores se comparados a arcos em outras condições, como por exemplo, em uma linha de transmissão, onde 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, é 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).

Figura 5 – Fase de *buildup* e detalhes dos *shoulders*.

Fonte: Nakagomi (2006).

Os equipamentos comumente usados são:

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

2.4.1 Chaves-fusíveis

São dispositivos constituídos de um porta-fusível e outra parte destinada a receber um elo fusível. A Figura 6 mostra um modelo de chave-fusível utilizada em sistemas de distribuição. Cada tipo de fusível é projetado para suportar uma corrente nominal, que representa o valor de corrente que este pode suportar continuamente, sem deteriorar-se ou exceder os limites de temperatura 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 seguida.

Figura 6 – Chave fusível de distribuição.

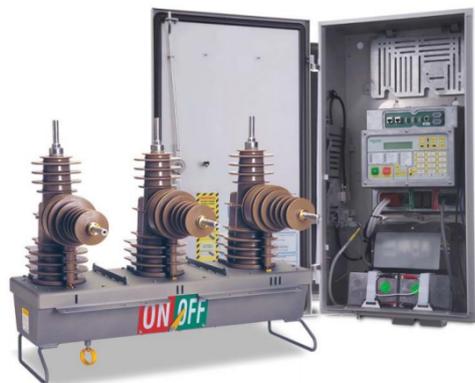


Fonte: Hubbell Power Systems (2019).

2.4.2 Religador Automático

É um dispositivo interruptor automático, que abre e fecha seus contatos repetidas vezes quando ocorre uma falta no circuito por ele protegido. A Figura 7 apresenta um exemplo de religador automático.

Figura 7 – Religador automático de distribuição.



Fonte: Schneider Eletric (2019).

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 novamente 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. Na Figura 8, pode-se visualizar um exemplo de seccionador.

Figura 8 – Seccionador automático de distribuição.



Fonte: S&C Eletric Company (2019).

Basicamente, tal dispositivo 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. A Figura 9 ilustra um modelo de disjuntor de média tensão.

Figura 9 – Exemplo de disjuntor de média tensão.



Fonte: ABB (2019).

2.5 Métodos Existentes para a 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 é a Transformada Wavelet. Outra forma, é a detecção de rompimento de condutores de forma mecânica. Ambas as formas serão exemplificadas nesta seção.

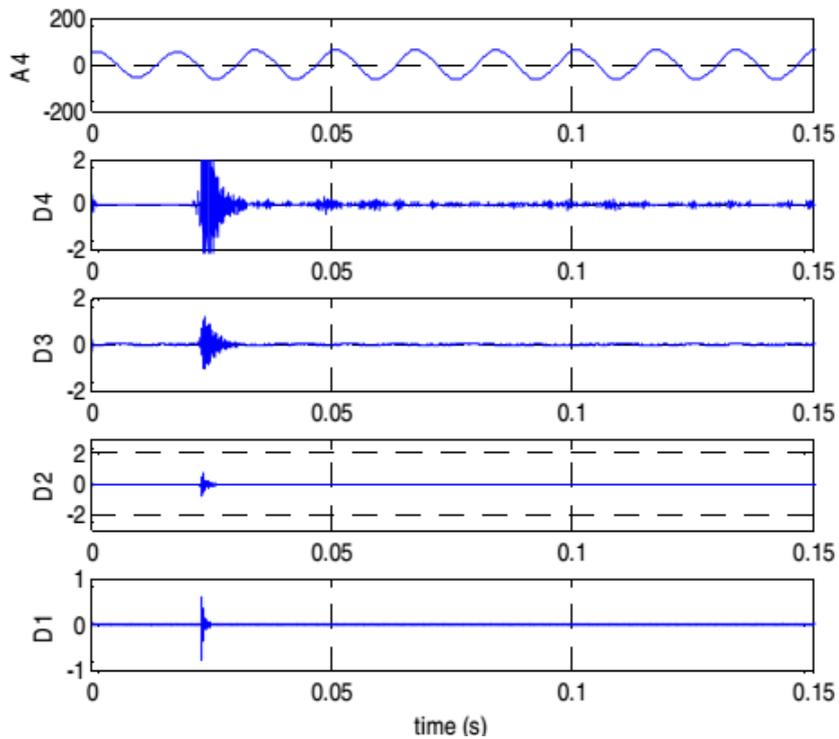
Após montar um sistema teste de simulação de FAI no programa *EMTP-ATP*, utilizando dados reais registrados em uma subestação, Torres e Ruiz (2011) usaram Transformada Wavelet Discreta (TWD) para análise do sinal de corrente do alimentador desse sistema, na fase em que havia ocorrido a falta.

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 frequências inferiores e em detalhes onde aparecem as componentes de frequências elevadas.

A Figura10 mostra o resultado da aplicação da TWD na fase do alimentador que ocorreu a falta de alta impedância, conforme o trabalho de Torres e Ruiz (2011). 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.

Uma comparação importante é apresentada na Figura11, 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 ocorre em toda a extensão da janela, enquanto que, nas

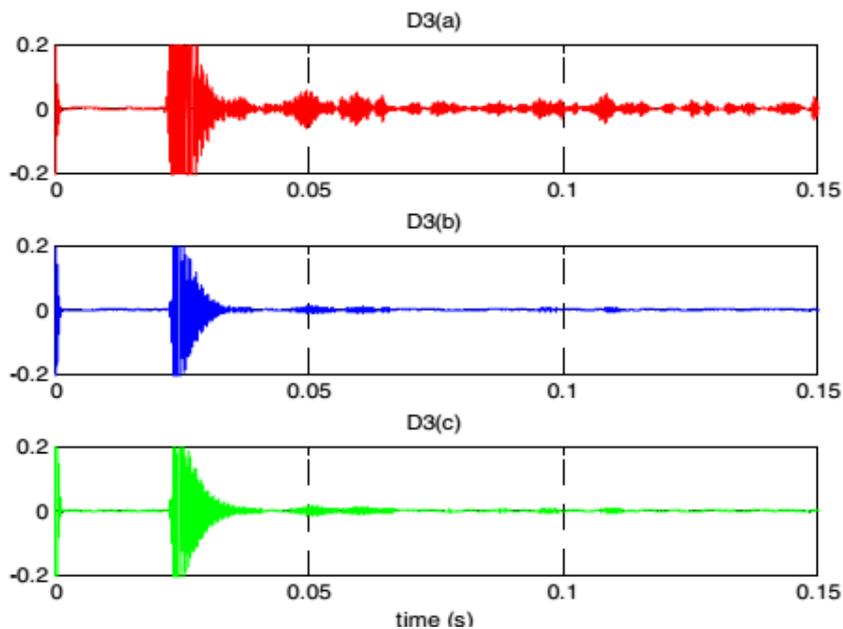
Figura 10 – Decomposições da TWD na fase em falta do alimentador.



Fonte: Torres e Ruiz (2011).

demais fases, essas componentes só aparece no instante inicial da falta.

Figura 11 – Decomposição D3 de todas as fases do alimentador.



Fonte: Torres e Ruiz (2011).

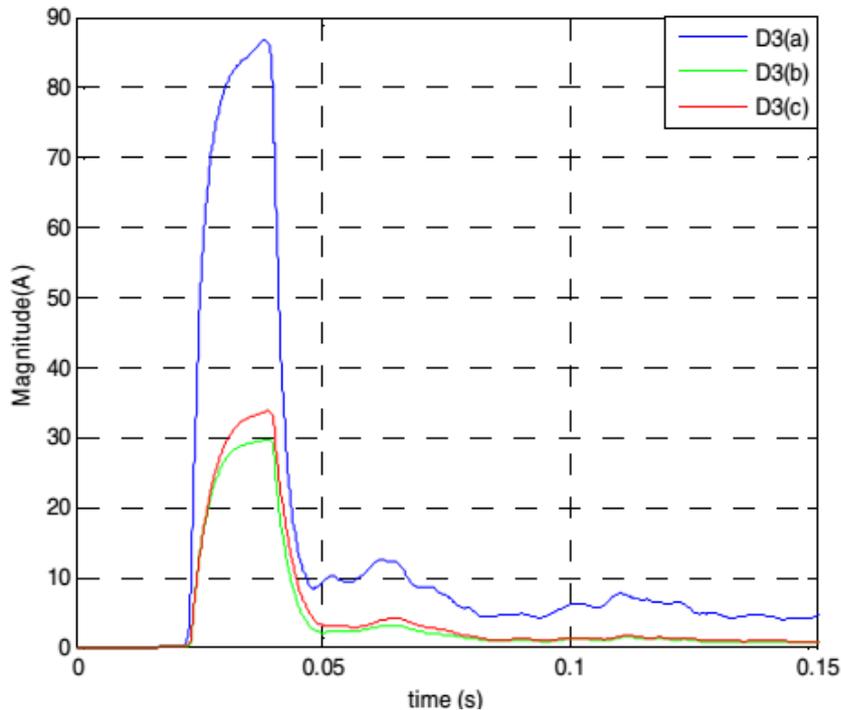
Para melhor entender essa diferença, é feito um somatório do valor absoluto de todos

os componentes de alta frequência contidos na decomposição D3, conforme 2.1. Na Figura 12, 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 o verificado para as demais fases.

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

Em 2.1, $S(k)$ é o detector, n corresponde à amostragem e N é o número da janela amostrada.

Figura 12 – Somatório do valor absoluto da decomposição D3 para todas as fases do alimentador.



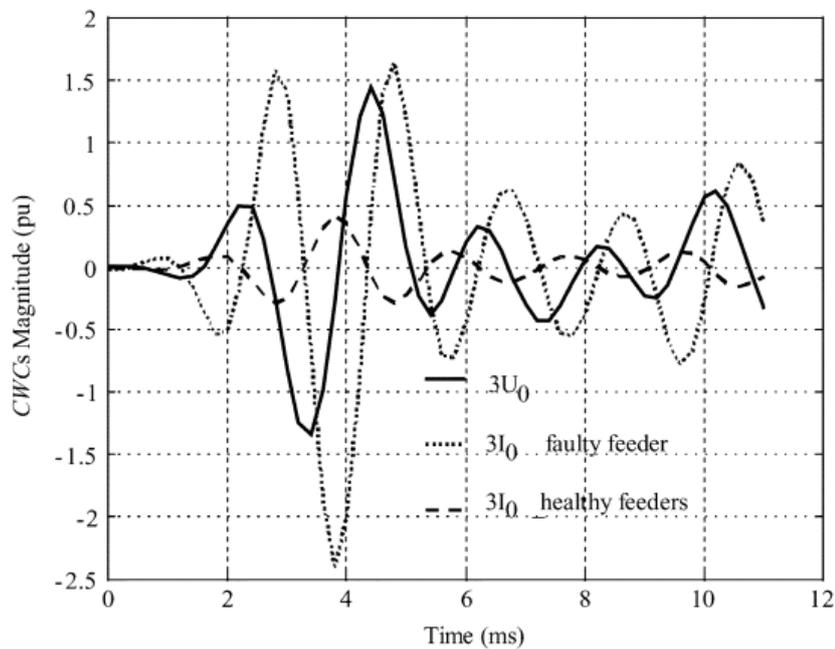
Fonte: Torres e Ruiz (2011).

Outra maneira de detecção de FAIs utilizando os coeficientes da Transformada Wavelet Contínua (TWC) é proposta no trabalho de Michalik et al. (2006). Para isso, foi montado um sistema teste no *EMTP-ATP* 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 simulada a falta, alterava o valor de uma resistência variável pelo uso da equação geral do arco, conforme 1.1.

Com os resultados das simulações, era aplicada a TWC para tensão e corrente de sequência zero do alimentador. A detecção era feita com base na defasagem entre o resultado dos coeficientes da TWC para essas tensões e correntes. A Figura 13 mostra o resultado dessa transformada, bem como, a defasagem entre as grandezas.

Um outro método interessante, proposto por Neto (2005), é a implantação de sensores de corrente com comunicação via rádio exclusivos para detecção de FAIs. Com isso, era aplicado

Figura 13 – Defasagem entre os coeficientes da TWC (CWCs) da tensão e corrente de sequência zero da fase em falta e de uma fase em condições normais.



Fonte: Michalik et al. (2006).

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 Figura 14 mostra o sensor de corrente que deve ser instalado em torno do condutor.

Figura 14 – Sensor de corrente com comunicação via rádio.

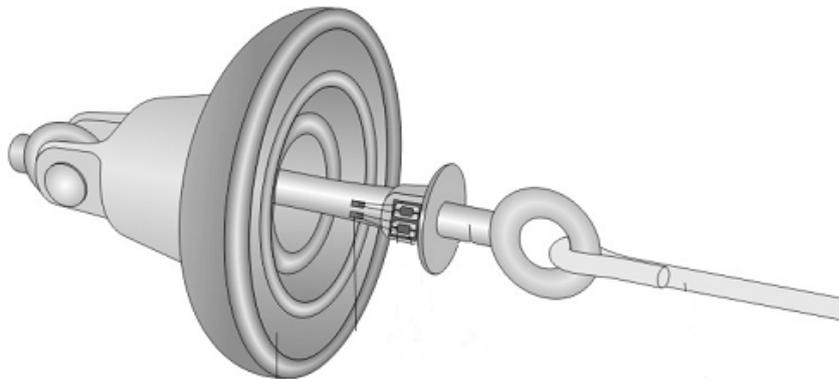


Fonte: Neto (2005).

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 rompe, ocorrem mudanças na tração mecânica dos isoladores que o sustentam. 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 Figura 15 demonstra a aplicação de extensômetros num isolador de ancoragem.

Figura 15 – Isolador de ancoragem com o extensômetro.



Fonte: 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 os problemas causados por uma falta de alta impedância. Isso ocorre porque os dispositivos de proteção convencionais são sensibilizados por 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. Assim, 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, sejam bastante eficazes. Outros fenômenos importantes ocorridos nas FAIs, como a fase de *buildup*, também foram apresentados. Por fim, cabe destacar que este tipo de falta pode apresentar tanto um comportamento firme quanto errático, sendo as vezes uma senoide comum e, em outras, 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 gerado 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 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.

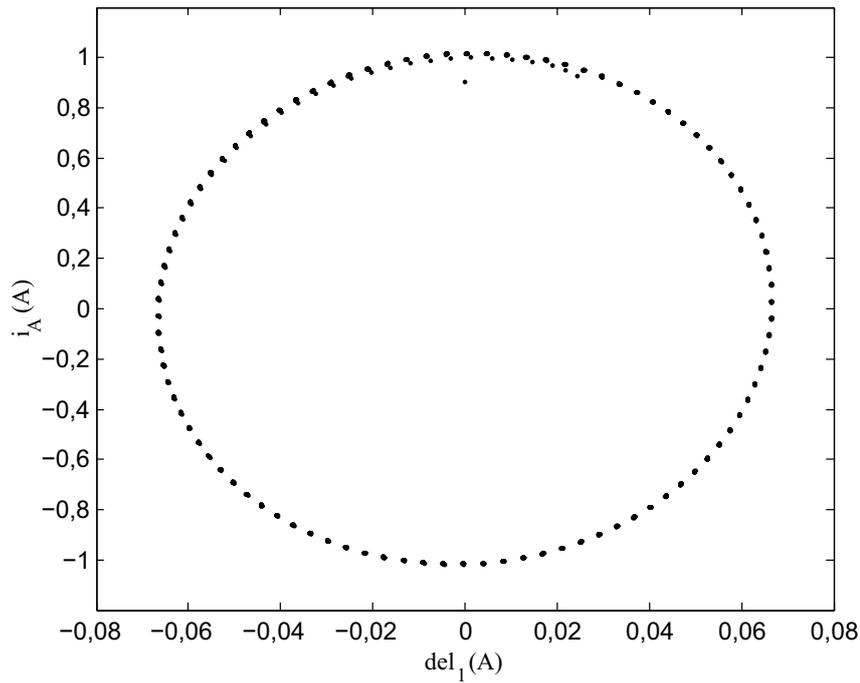
$$del_1(n) = i_a(n) - i_a(n - 1) \quad (3.1)$$

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 Figura 16.

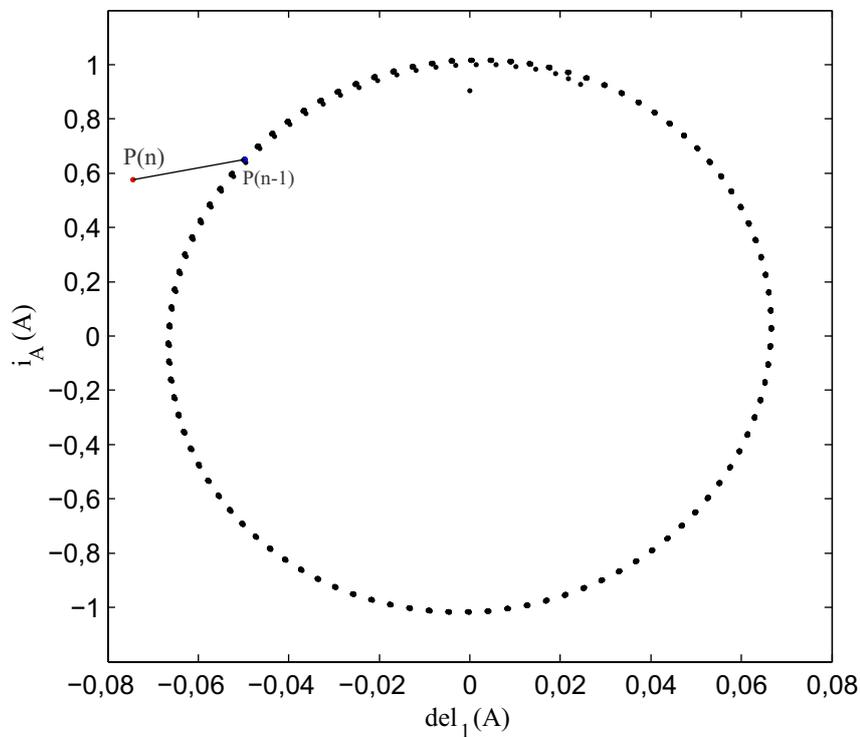
Nessas condições, a distância entre dois pontos consecutivos é relativamente pequena. Entretanto, quando ocorre um transitório no sistema elétrico que altere bruscamente a forma de onda da corrente amostrada, os pontos são desviados da trajetória de operação normal. No instante que ocorre essa variação brusca, a distância entre pontos consecutivos sofre um incremento elevado de forma súbita. Essa variação pode ser observada na Figura 17, onde a reta traçada entre os pontos $P(n-1)$ e $P(n)$ representa 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 por (3.2).

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

Figura 16 – Plano formado por del_1 e i_a antes da ocorrência do transitório.

Fonte: Autor.

Figura 17 – Plano formado por del_1 e i_a no momento em que ocorre o transitório.

Fonte: Autor.

O valor de ajuste para a detecção de um transitório é calculado conforme (3.3) e é

atualizado a cada nova amostra.

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

Na Equação 3.3, 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. O desempenho da metodologia proposta também foi testado para amostragem de 128 amostras por ciclo.

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:

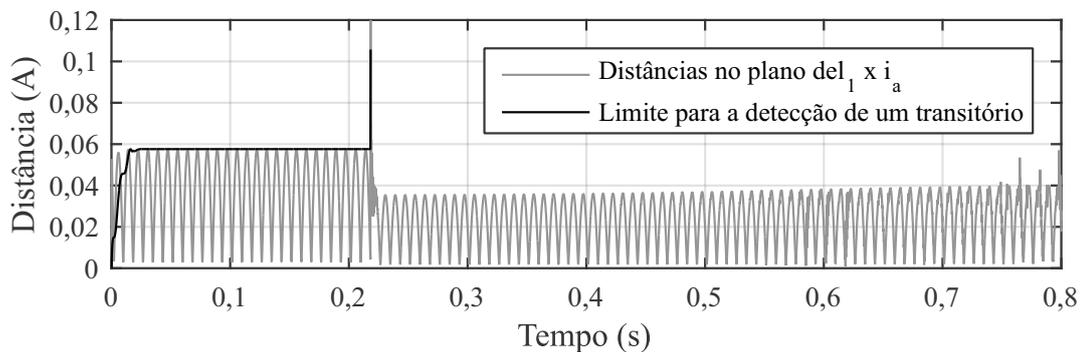
$$janela_1(n) = [dist_1(n-95) \quad dist_1(n-94) \quad \dots \quad dist_1(n)] \quad (3.4)$$

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

Assim, um transitório é detectado quando a condição dada pela Expressão 3.6 for satisfeita. A Figura 18 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 18 – Exemplo do detector de transitório.



Fonte: Autor.

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 cinco ciclos.

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

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

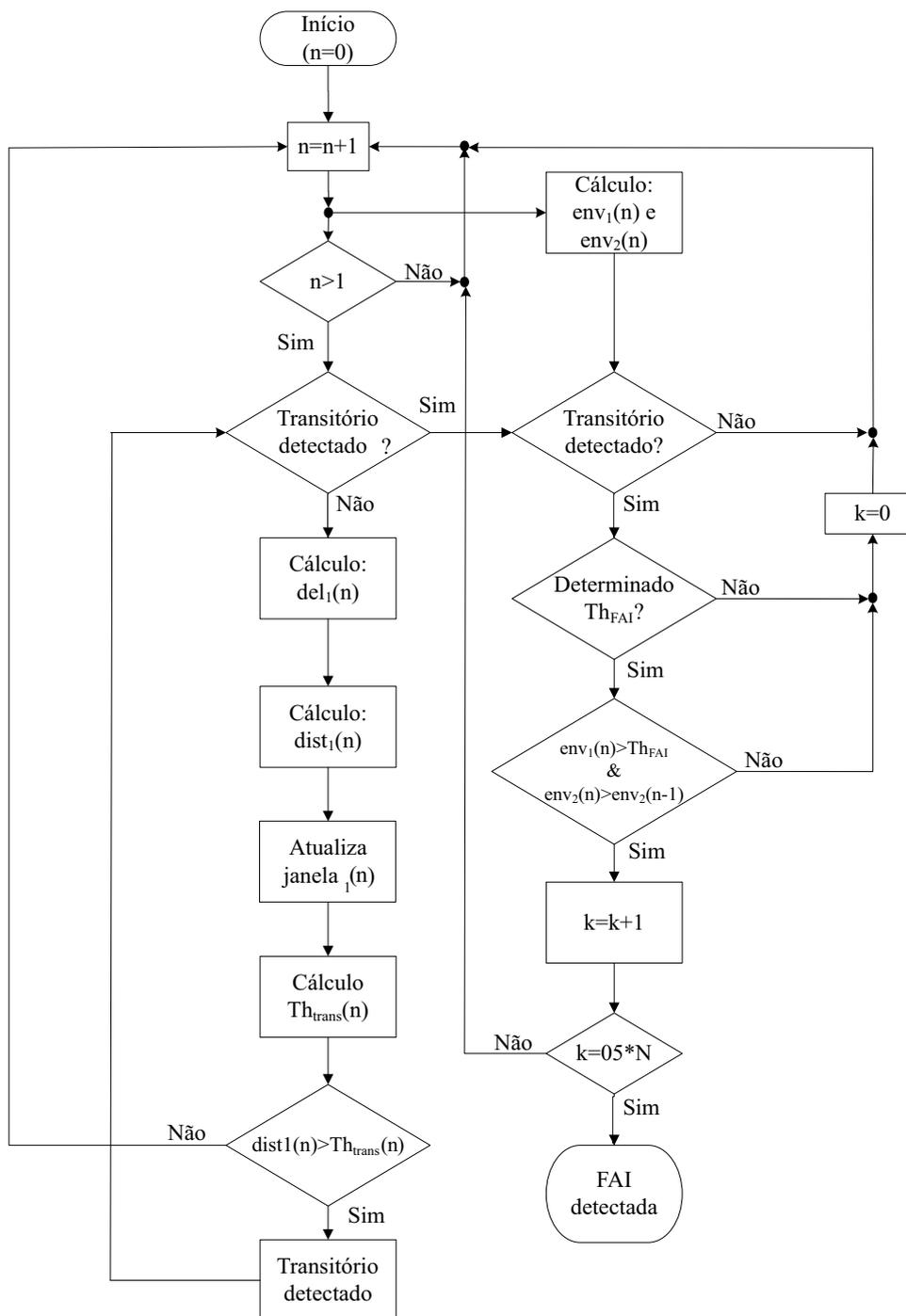
Um fluxograma que envolve todos os processos da técnica proposta, incluindo o detector de transitórios e o classificador de FAIs, é mostrado na Figura 19.

3.4 TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FAIs PELA CORRENTE DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

Proposto por Oliveira (2013), esse método foi implementado com o intuito de comparar sua atuação com aquela apresentada pela metodologia proposta, frente aos diversos casos analisados. Tal método trata a detecção de FAIs através da corrente de sequência negativa e as assinaturas nela referenciadas. Toda vez que um valor limítrofe para a corrente de sequência negativa é ultrapassado, fica caracterizada uma FAI. Acredita-se que a necessidade do conhecimento prévio das características de carga e dos níveis de desbalanço da rede em questão sejam uma desvantagem deste método, visto que esse conhecimento prévio é indispensável para determinação do valor limítrofe de corrente de sequência negativa.

Segundo Oliveira (2013), o modelo de FAI aplicado é baseado nos trabalhos de Nam et al. (2001) e Nakagomi (2006), os quais modelam com sucesso as FAIs. Conforme referido anteriormente, a detecção da FAI é feita com base na medição da corrente de sequência negativa, a qual se apresenta quando sistemas trifásicos encontram-se desequilibrados. Essa componente não surge em curto-circuitos trifásicos, tão pouco surgem de maneira expressiva quando cargas não-lineares trifásicas são ligadas à rede.

Figura 19 – Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Autor.

Oliveira (2013) desenvolveu um modelo no qual as entradas são as leituras dos TCs de cada fase. Elas são amostradas com taxas equivalentes a 24 amostras por ciclo, quantizadas em 8 bits e usadas para o cálculo dos fasores de cada fase. Através desses fasores, é calculada 3.11 a

componente de sequência negativa dos respectivos sinais de corrente, conforme a Equação 3.11.

$$\begin{bmatrix} I0 \\ I1 \\ I2 \end{bmatrix} = [F^{-1}] \times \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

O algoritmo desenvolvido por Oliveira (2013) não utiliza o comportamento transitório, mas sim o regime permanente, pelo fato de que, segundo Anderson (1998), dificilmente, num sistema de distribuição, uma variação de carga normal se dará de maneira tão brusca que insira 30 A de corrente de sequência negativa no sistema, por exemplo, em um curto espaço de tempo.

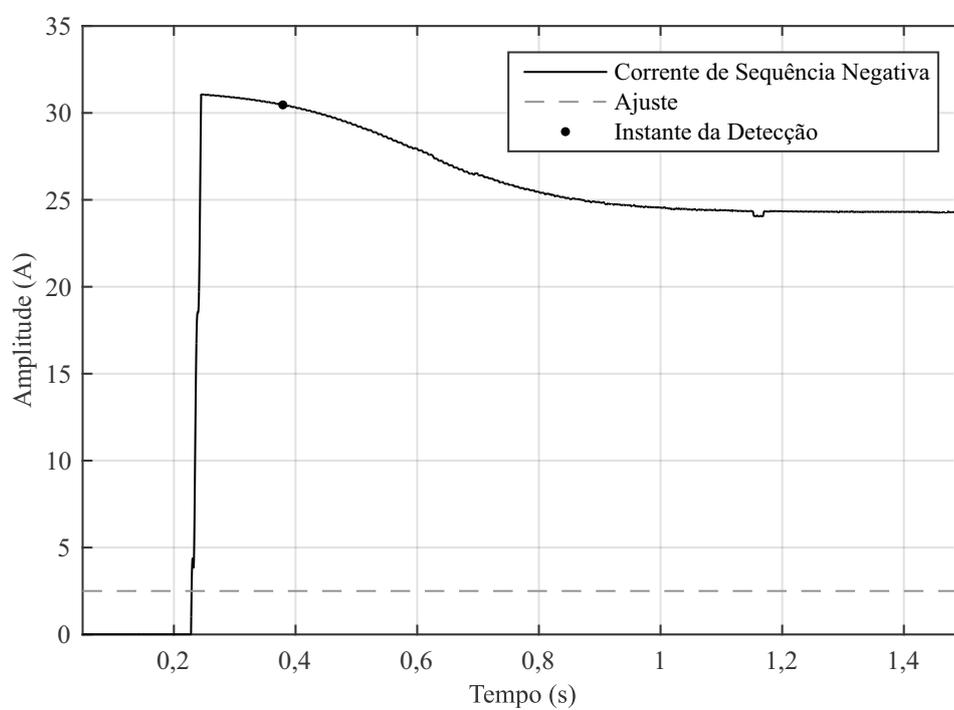
Segundo Anderson (1998), grandes cargas não-lineares, como indústrias por exemplo, ligam e desligam suas cargas do sistema de maneira trifásica e efetivamente simultânea, o que causa transientes de corrente de sequência negativa que logo são sanados, ou não se mantêm num nível constante. Faltas que desliguem um ramo particularmente denso de um alimentador poderiam, subitamente, injetar uma grande quantidade de corrente de sequência negativa no sistema. Todavia, para isso, essa falta deve ser desbalanceada e, se não disparar a atuação de nenhuma das proteções na subestação, é muito provável que tal falta seja uma FAI.

Para atuação deste método, como mostrado no exemplo da Figura 20, dois ajustes são necessários: a corrente de pick-up (I_p) e o tempo de temporização (t_t). Quando a corrente de sequência negativa ultrapassa o valor de ajuste, representado pela linha tracejada da referida Figura, o algoritmo inicia a temporização. Se a corrente se manter acima do ajuste além do tempo ajustado, o evento fica classificado como FAI, como acontece no exemplo da Figura mencionada, fato destacado pelo ponto preto do gráfico. Para ambos os ajustes, é necessário que se conheça o comportamento da FAI no alimentador. Assim, para o ajuste desses parâmetros, testes e estudos se tornam necessários por parte da concessionária. No caso de I_p , este deve ser um ajuste variável de acordo com a carga do alimentador.

3.5 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 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.

Figura 20 – Exemplo de detecção do método da corrente de sequência negativa.



Fonte: Autor.

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 7 (sete) dos 177 (cento e setenta e sete) casos analisados, sendo estes: dois eventos de faltas de alta impedância, um de entrada e um de saída de carga, um de curto-circuito monofásico, um de energização de transformador e um de chaveamento de banco de capacitores, todos realizados afim de demonstrar a eficácia do método proposto.

A ferramenta computacional utilizada para realização das simulações foi o *EMTP-ATP*, o qual é um programa amplamente utilizado para simulação de eventos transitórios em sistemas elétricos de potência.

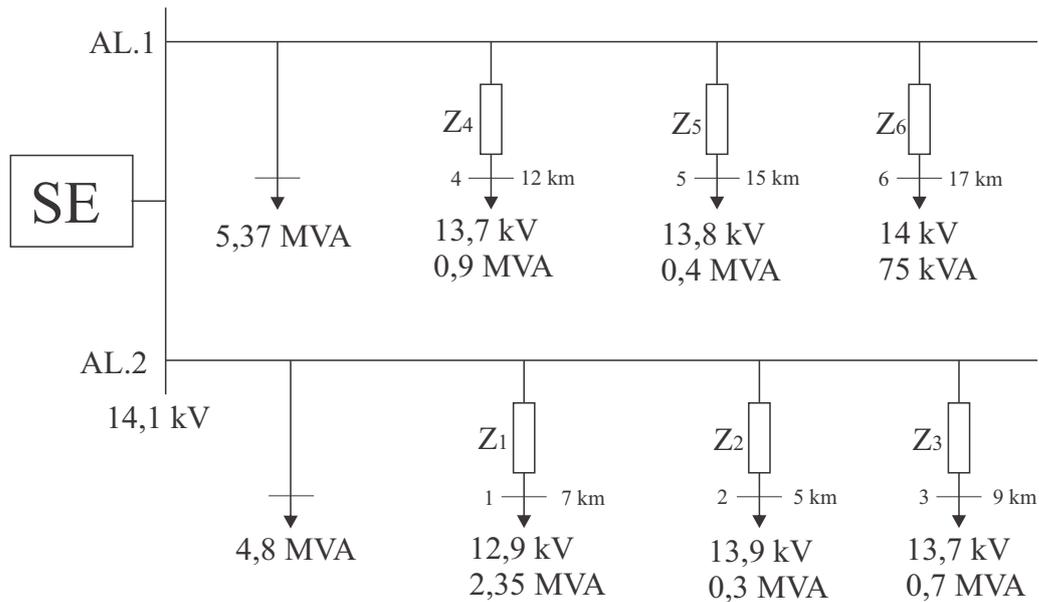
Para implementar os algoritmos e tratar os sinais gerados no *EMTP-ATP*, foi utilizado o programa MATLAB[®].

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 Figura 21.

As simulações foram realizadas em todas os seis barras que estão numeradas no sistema teste. No total foram simulados 103 casos de Faltas de Alta Impedância com diferentes valores resistência inicial de falta de 100, 250, 350 e 450 Ω e variando também os instantes da incidência do evento e a taxa de amostragem. 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 cargas, energização de transformador e chaveamento de banco de capacitores para diferente taxas de amostragem. As impedâncias dos cabos acumuladas nos trechos dos alimentadores foram consideradas iguais em cada fase e seus respectivos valores podem ser vistos na tabela2.

Figura 21 – Sistema teste utilizado para validar o algoritmo.



Fonte: Autor.

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

Fonte: Autor.

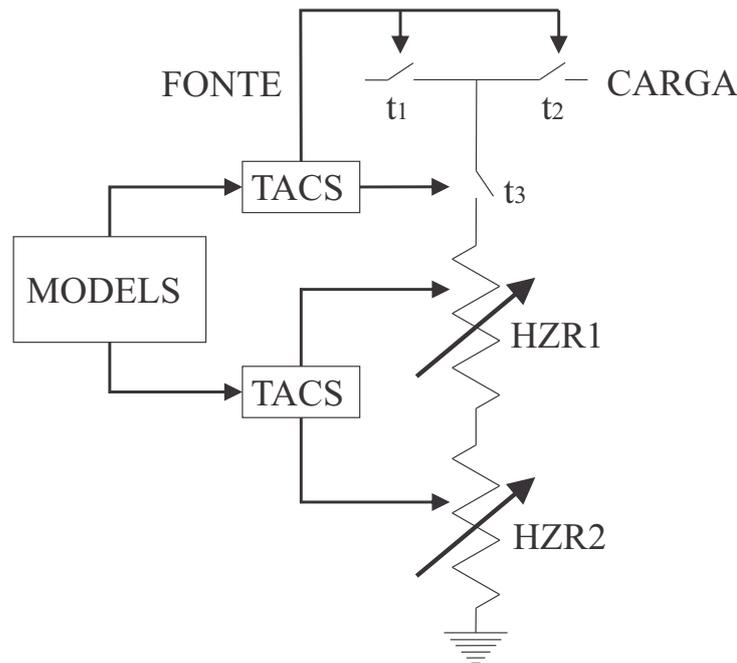
4.3 Modelo Computacional Utilizado para Simulação da FAI

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, o qual 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* do *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 repre-

sentação do arranjo desse modelo está representado na Figura 22. As chaves t_1 e t_2 definem, respectivamente, se a falta ocorre 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 22 – Modelo computacional para simulação de FAIs.



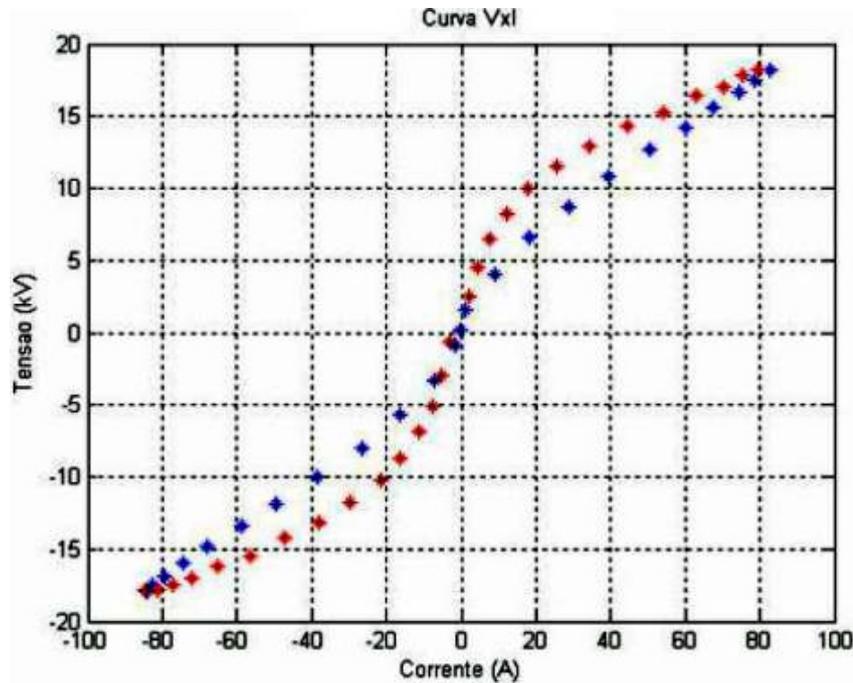
Fonte: Nakagomi (2006).

4.3.1 Controle da Resistência HZR1

O objetivo desta resistência é produzir e 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 Figura 23. 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 Figura 23, 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 23 – Característica VxI para falta de alta impedância.



Fonte: 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 em por unidade (p.u), utilizando as bases de acordo com (4.1), generalizando a utilização deste modelo.

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

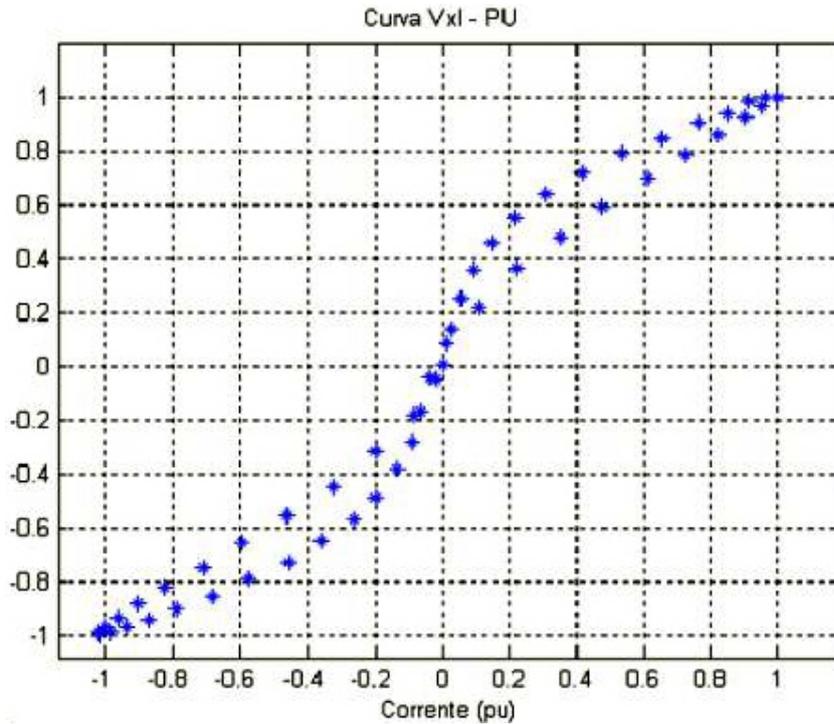
Em (4.1), V_{BASE} e R_{falta} correspondem, respectivamente, à tensão nominal de fase do alimentador e a máxima resistência de falta no ponto onde ocorreu o evento.

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 renormaliza 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, porém, com as mesmas características. O gráfico da curva com os valores normalizados encontra-se na Figura 24

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

Figura 24 – Curva VxI de da falta de alta impedância com valores em p.u.



Fonte: Nakagomi (2006).

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 na Equação 4.2.

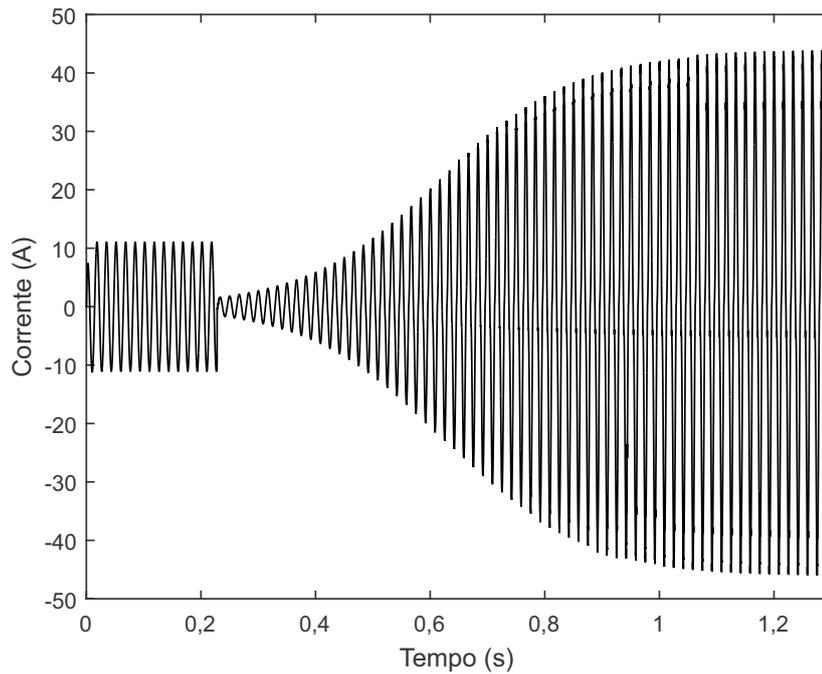
$$HZR2 = 10R_{falta} \times 2,9030970612 e^{-0,27311517629 \frac{25t}{0,8}} \quad (4.2)$$

A resistência total do modelo é dada pela soma das resistências *HZR1* e *HZR2*, como mostra a Figura 22. Os resultados da utilização desse modelo podem ser vistos nas Figuras 25 e 26. 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 250 Ω. Nela é possível observar claramente a fase de *buildup*. A segunda Figura mostra de forma ampliada alguns ciclos da corrente de falta, onde é possível observar as distorções causadas pelo arco elétrico.

4.4 Resultados

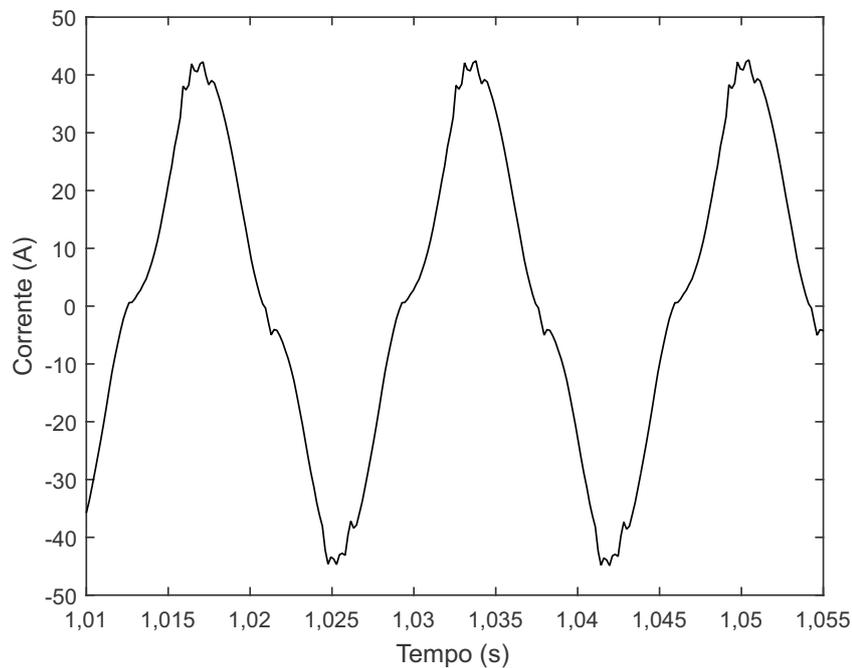
Para testar o funcionamento da técnica proposta, foram simulados cento e setenta e sete casos utilizando os sinais de corrente gerados no *EMTP-ATP* com base no sistema teste da Figura 21. Os casos envolveram faltas de alta impedância do lado da fonte, com valores de resistência de falta variando entre 100 e 450 Ω, para diferentes instantes de incidência da falta, em todos os seis pontos indicados no sistema teste, de modo a se obter diferentes formas de assimetria do sinal de corrente. As simulações ainda contaram com casos de entradas e saídas de

Figura 25 – Forma de onda da corrente no ponto de ocorrência da falta de alta impedância.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Detalhe das distorções características do sinal de corrente para uma FAI.



Fonte: Autor.

diferentes cargas, energização de transformadores e chaveamento de banco de capacitores em variados instantes da simulação.

Dentre os casos analisados, uma vez que os resultados apresentaram similaridades, somente duas ocorrências de FAI e as situações de entrada e 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. Por sua vez, o segundo caso de FAI, ocorrido no ponto 6, o qual é bastante distante e com uma carga relativamente pequena, caracteriza-se por ser um evento de difícil 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 teste com 4 tipos de cargas em diferentes instantes.

Os resultados obtidos em todas as situações analisadas encontram-se resumidos na Tabela 3 do Apêndice A. Todas as simulações foram realizadas para taxas de amostragem de 128 e 192 amostras/ciclo. Ressalta-se que os sinais de corrente foram obtidos a partir da fase A de cada alimentador na saída da subestação.

4.4.1 Caso 1 - FAI no Ponto 2 do Sistema Teste

O caso 1 diz respeito a 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 0,22 s. Os resultados dessa simulação são demonstrados através das Figuras a seguir.

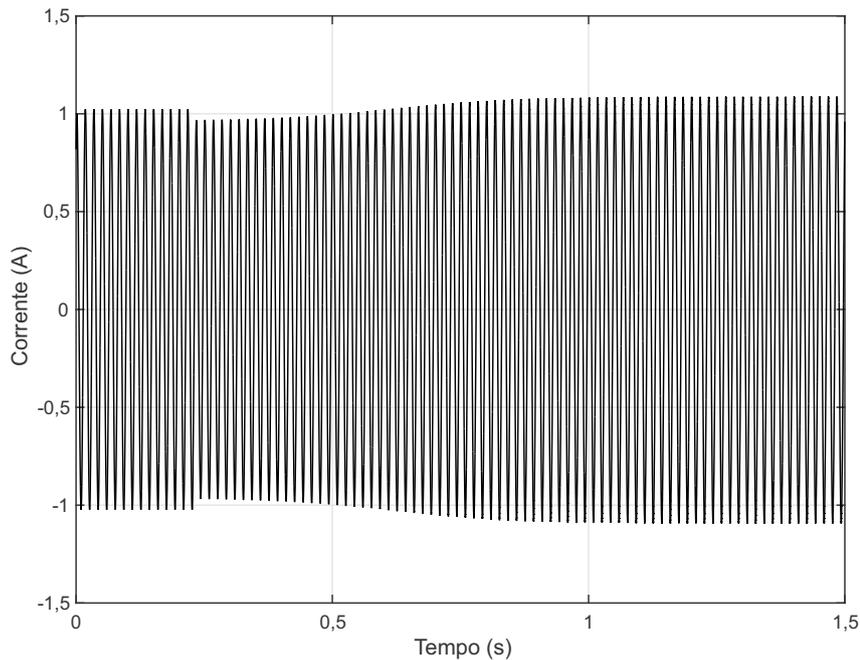
A Figura 27 mostra a corrente total na fase em que ocorreu a falta do respectivo alimentador. No instante em que ocorre a falta, é possível observar uma pequena redução na amplitude da corrente, a qual volta a crescer, alcançando valores semelhantes à condição normal de carga.

A atuação do detector de transitórios para este caso é apresentada na Figura 28. 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.

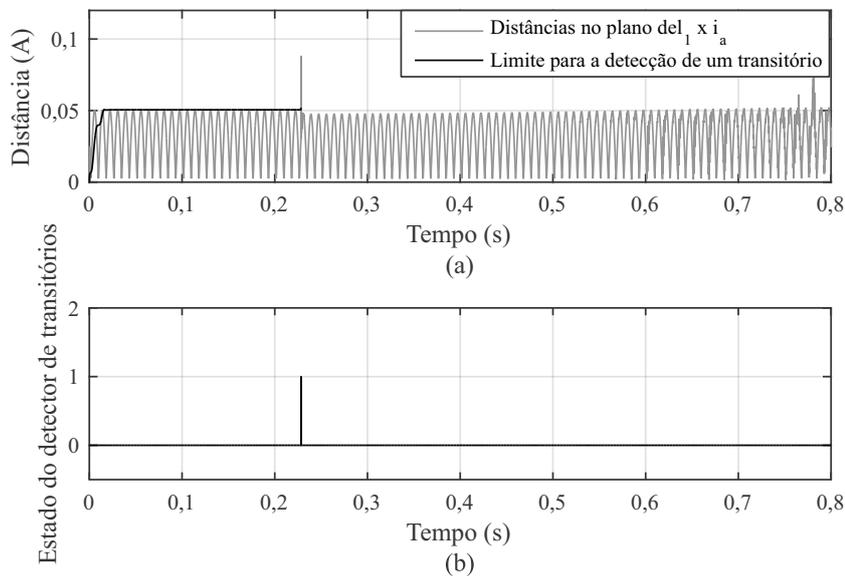
O gráfico contendo a disposição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante em que ocorre a falta é mostrado na Figura 29. O ponto circulado na figura indica o último ponto antes da ocorrência da falta. Já o ponto destacado com um "x" indica o momento exato em que a FAI ocorre. A reta traçada entre estes dois pontos representa o incremento na distância, o qual indica a ocorrência do transitório, em relação às distâncias entre os pontos consecutivos em preto, cuja distribuição representa a operação normal do sistema. Além disso, na Figura 30, 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 cinza).

Após a detecção do transitório, 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 Figura 31. O ponto circulado e o triângulo mostrados nessa figura, representam, respectivamente, o instante da detecção do transitório e da classificação evento. Ressalta-se que a classificação ocorreu no instante em que as condições explicadas no Capítulo anterior completam cinco ciclos sendo satisfeitas ininterruptamente. Ou seja, a envoltória do

Figura 27 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 1.



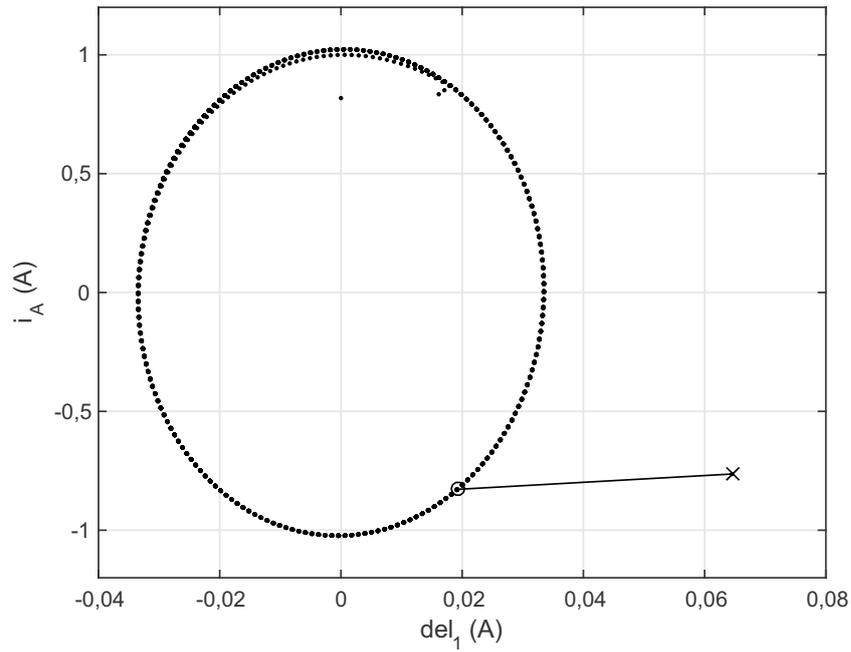
Fonte: Autor.

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

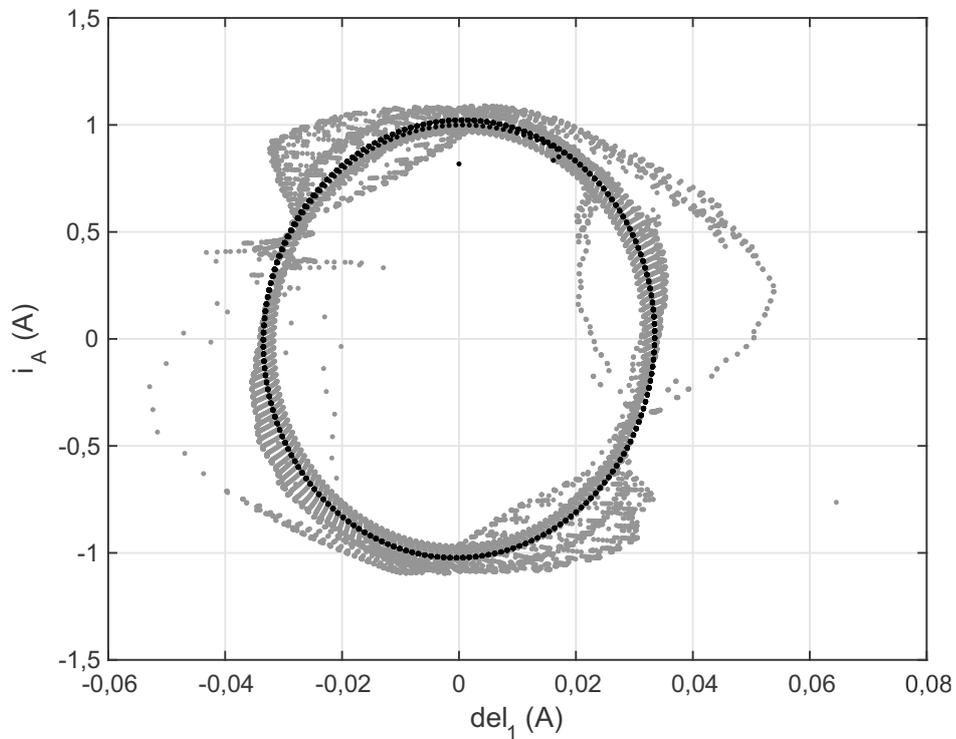
Fonte: Autor.

o sinal foi crescente e a linha tracejada (Th_{FAI}) apresentou um valor menor do que a envoltória dos valores máximos de corrente (env_1), representada na Figura pela linha pontilhada, por cinco 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 transitório e a correta classificação como FAI com grande robustez e

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

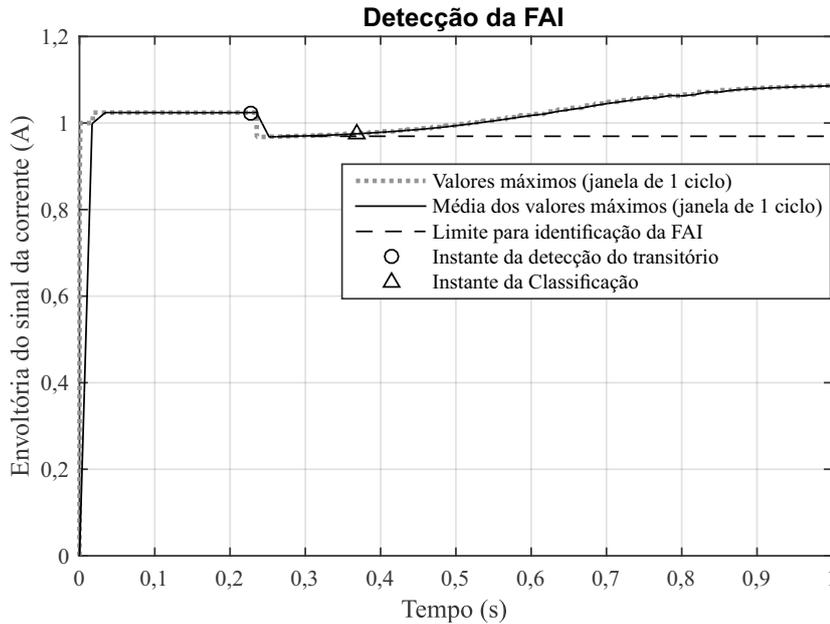
Fonte: Autor.

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

Fonte: Autor.

velocidade, mostrando ser eficaz para sua função.

Figura 31 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.



Fonte: Autor.

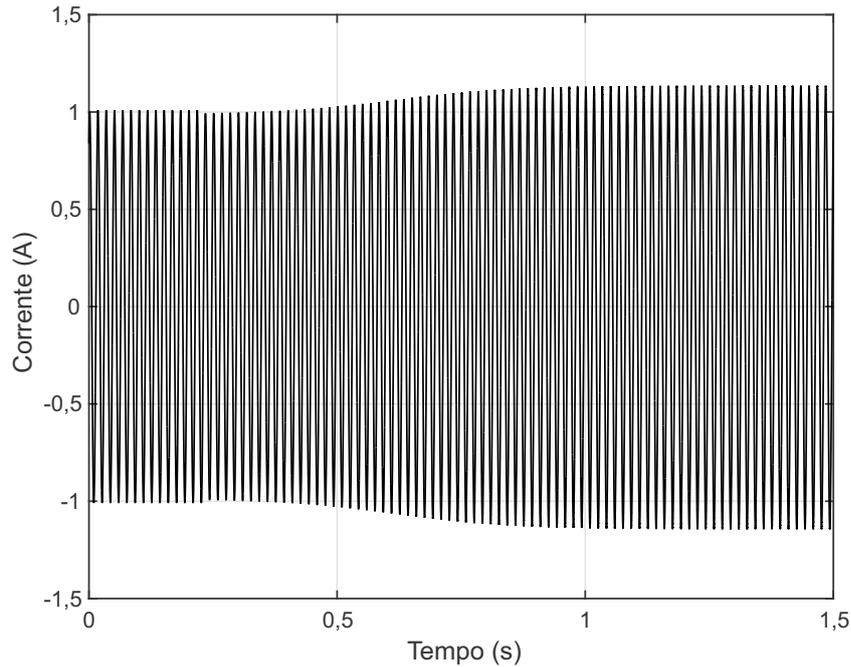
4.4.2 Caso 2 - FAI no Ponto 6 do Sistema Teste

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 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 Figura 32, é possível observar essas variações na corrente do alimentador. No instante de 0,22 s, 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 Figura 34 (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 Figura 34 (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 Figura 35

A distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ durante toda a simulação é mostrada na

Figura 32 – Forma de onda da corrente resultante da ocorrência da FAI para o Caso 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33. Novamente, os pontos em preto representam essa distribuição antes da falta, enquanto os pontos em cinza representam a distribuição após a incidência da falta.

Após a detecção do transitório, o algoritmo conseguiu classificar o evento como uma 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 Figura 36.

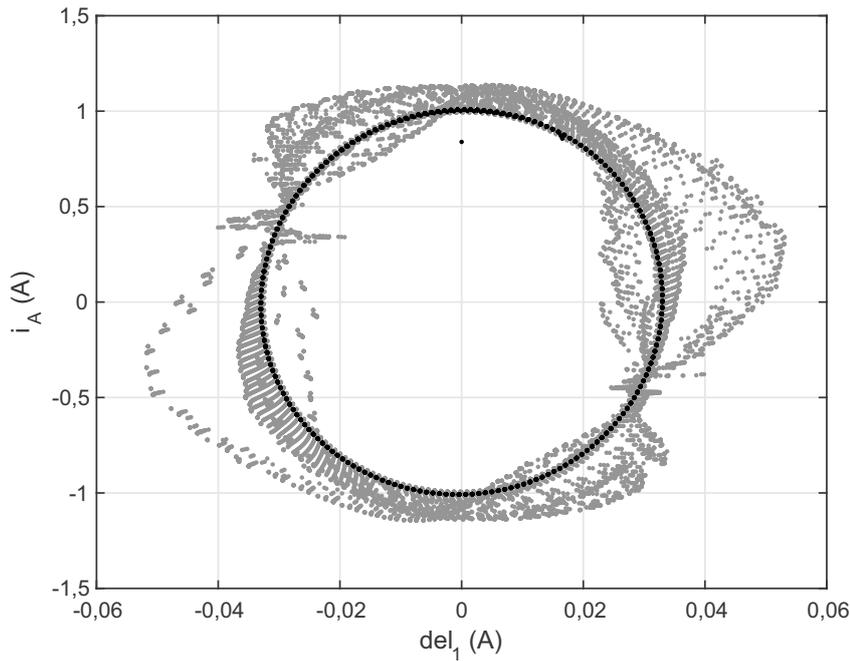
4.4.3 Caso 3 - Entrada de Carga no Segundo Alimentador

O terceiro caso descrito representa uma entrada da carga no ponto 4 do sistema teste, ocorrida no instante de 0,22 s. 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 Figura 37, 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 Figura 38. 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 Figura 39.

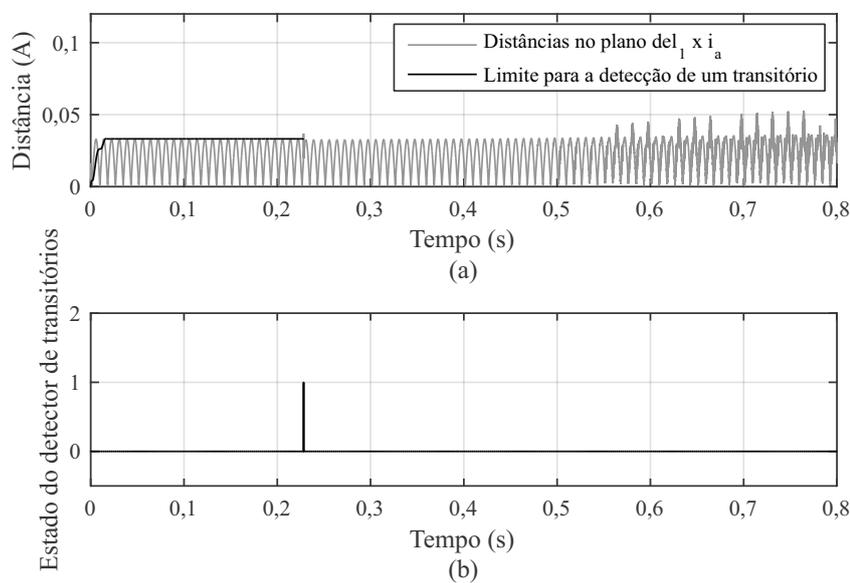
Já que, após o transitório, não foram satisfeitas as características que envolvem uma falta de alta impedância, como esperado, essa classificação não aconteceu. Isso pode ser visto na Figura 40, a qual mostra que o detector atuou corretamente e não reconheceu tal transitório como uma FAI.

Figura 33 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.



Fonte: Autor.

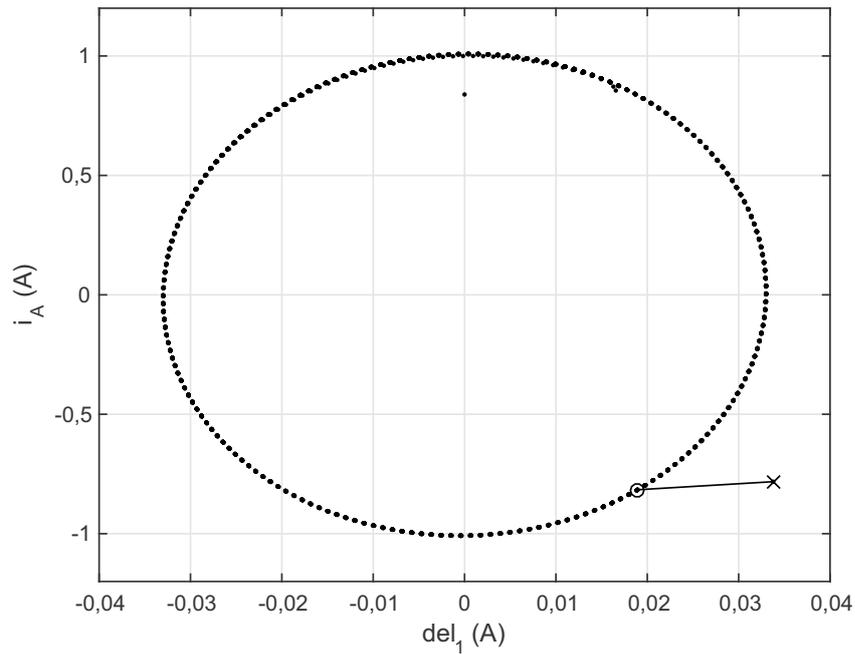
Figura 34 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivos no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.



Fonte: Autor.

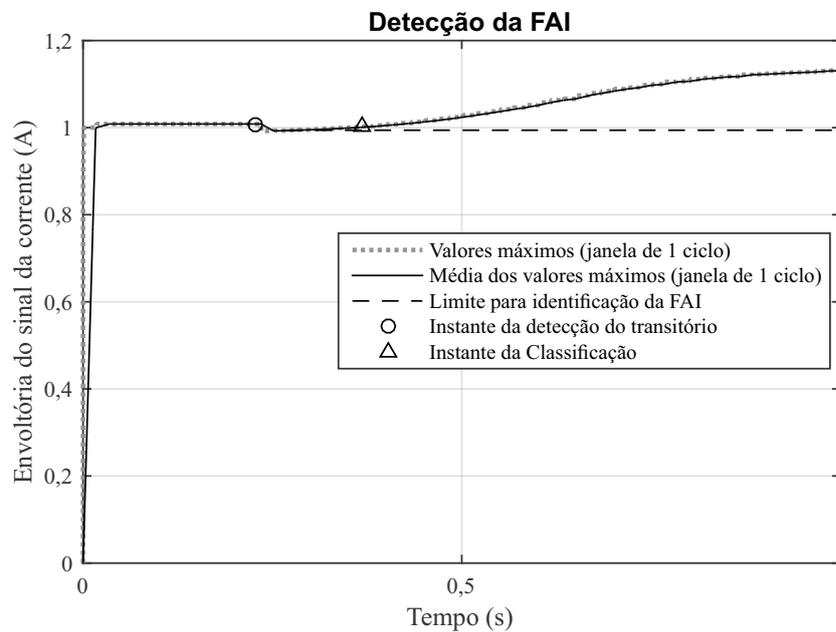
4.4.4 Caso 4 - Saída de Carga no Segundo Alimentador

De forma oposta ao caso 3, este 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

Figura 35 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ até o instante da ocorrência da falta.

Fonte: Autor.

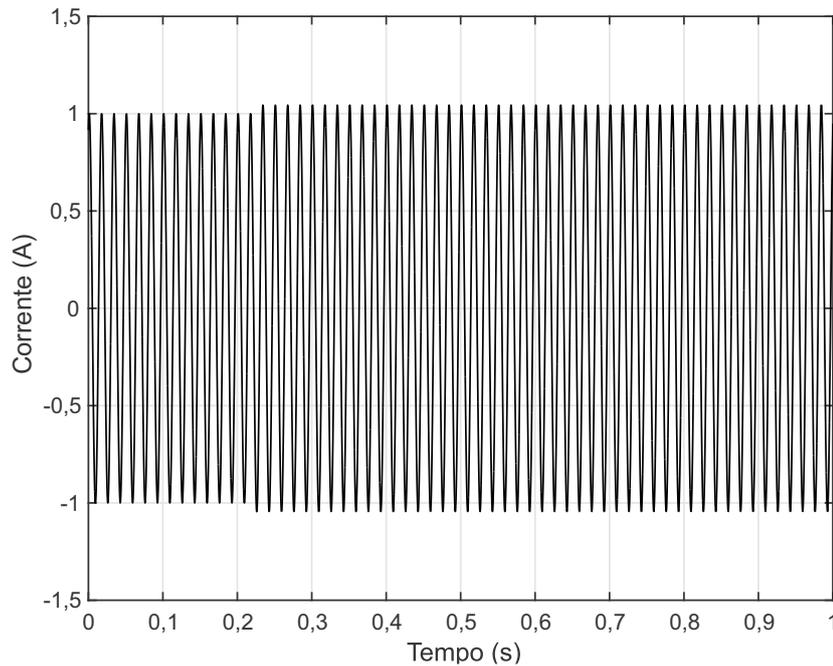
Figura 36 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.



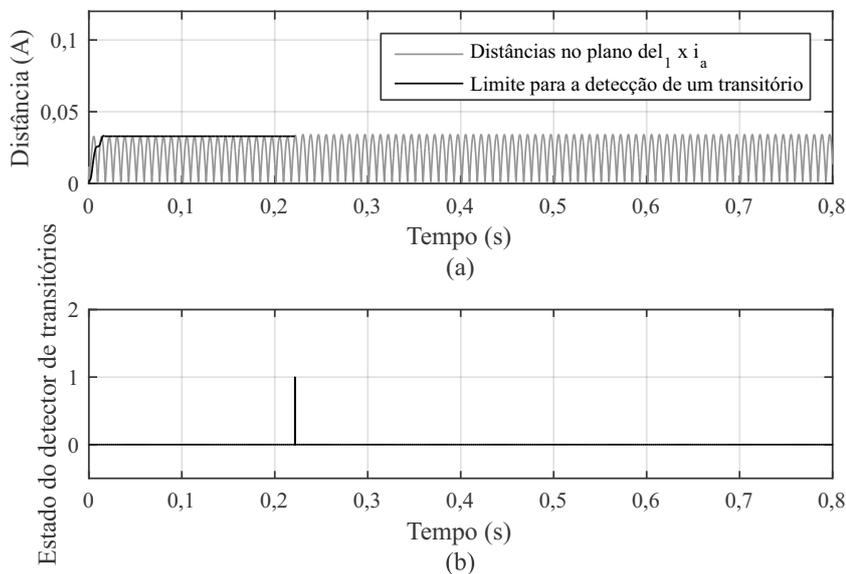
Fonte: Autor.

do alimentador, como pode ser visto na Figura 41, o detector de transitórios, cuja atuação é mostrada na Figura 42, não identifica a ocorrência do evento. Dessa forma, o algoritmo que identifica a FAI não atua.

Figura 37 – Forma de onda da corrente resultante da entrada de carga para o Caso 3.



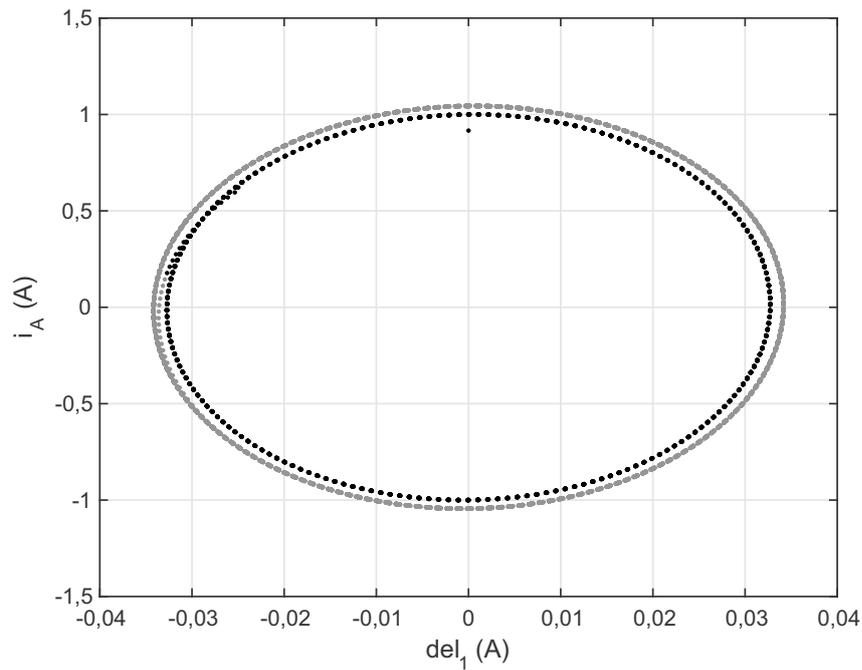
Fonte: Autor.

Figura 38 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.

Fonte: Autor.

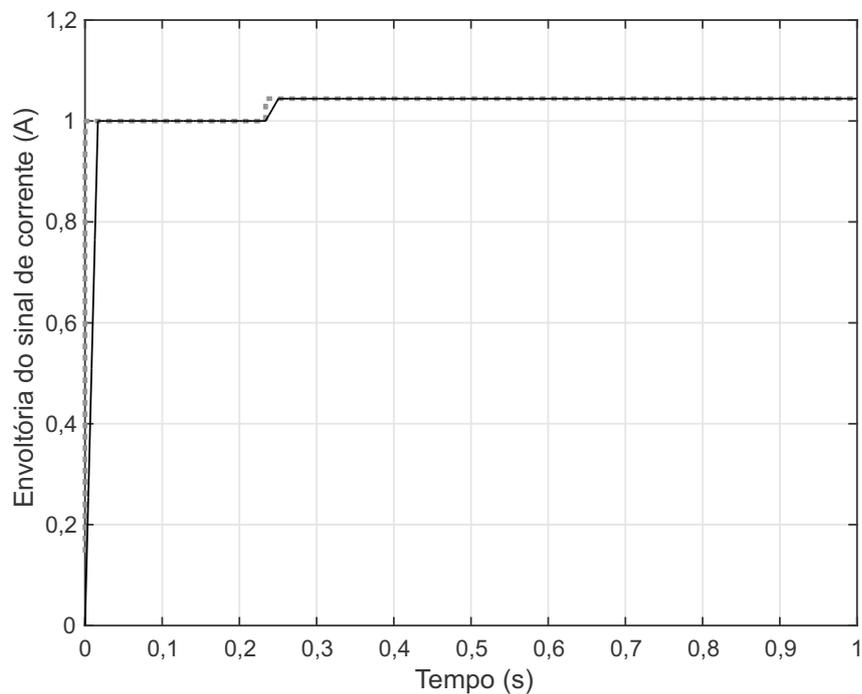
4.4.5 Caso 5 - Curto-circuito Monofásico no Ponto 5 do Sistema Teste

O quinto caso simula um curto-circuito monofásico ocorrido no instante de 0,3 s de simulação, localizado no ponto 5 do sistema teste da Figura 21. Semelhantemente ao terceiro caso, pode ser observado na Figura 43 que o sinal da corrente elétrica medido na fonte (Subestação do sistema teste) da fase em que ocorreu o curto-circuito sofre um significativo aumento de

Figura 39 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência da falta.

Fonte: Autor.

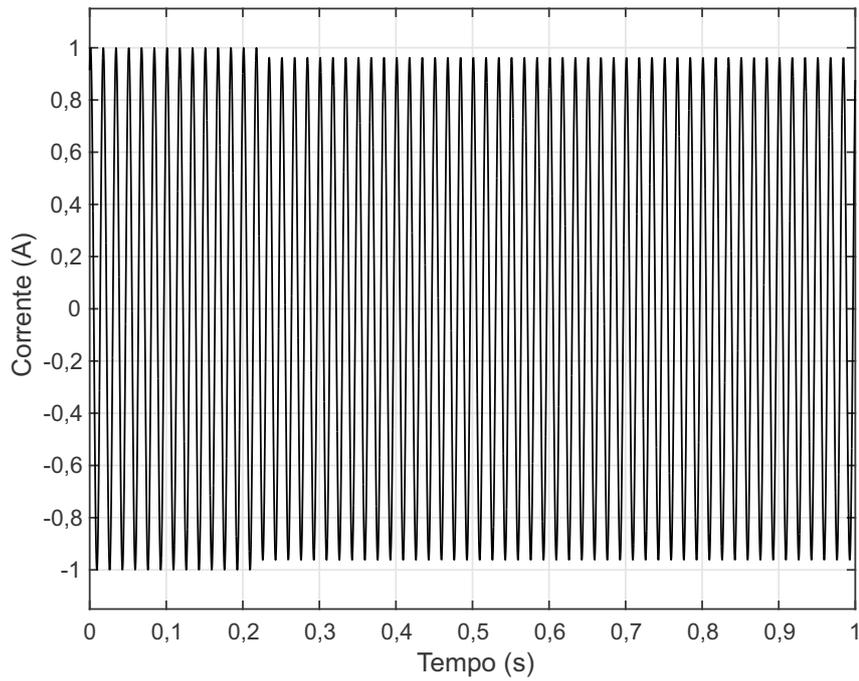
Figura 40 – Atuação da metodologia para classificação da FAI.



Fonte: Autor.

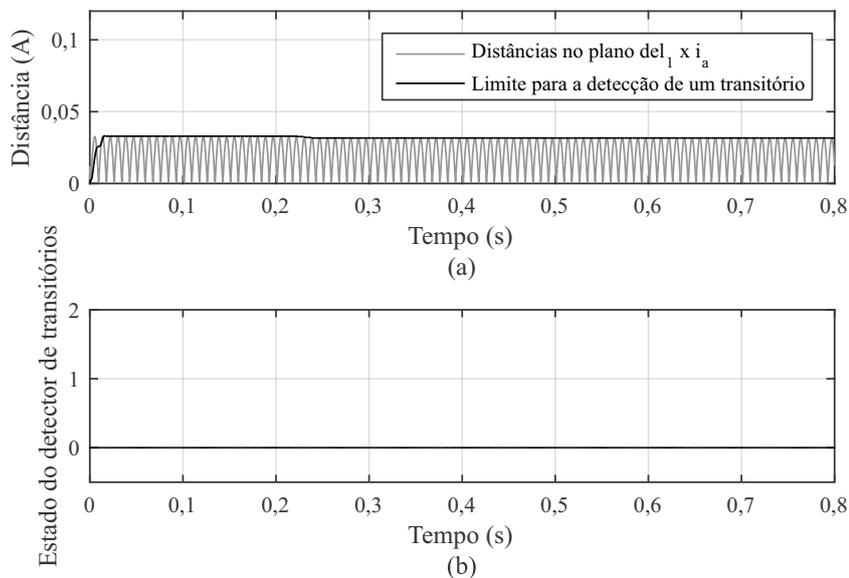
amplitude. Nesse caso, também houve a detecção do transitório, como mostra a Figura 44. A distribuição dos pontos no plano deste caso, apresentado na Figura 45, segue uma trajetória definida após a ocorrência do transitório, no entanto, ocupa um espaço bem maior do que no caso de entrada de carga. Essa característica é decorrente de um maior aumento na amplitude do

Figura 41 – Corrente resultante no segundo alimentador devido à saída da carga do ponto 4 do sistema teste.



Fonte: Autor.

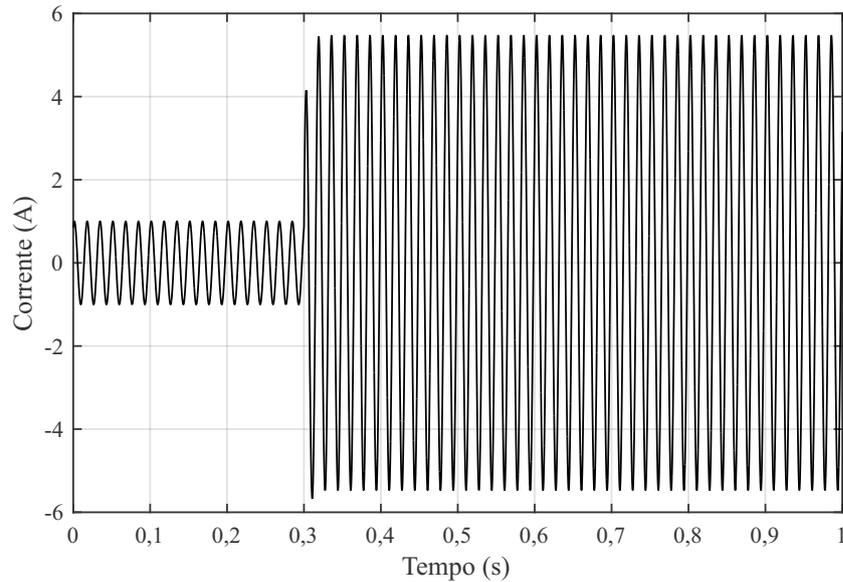
Figura 42 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.



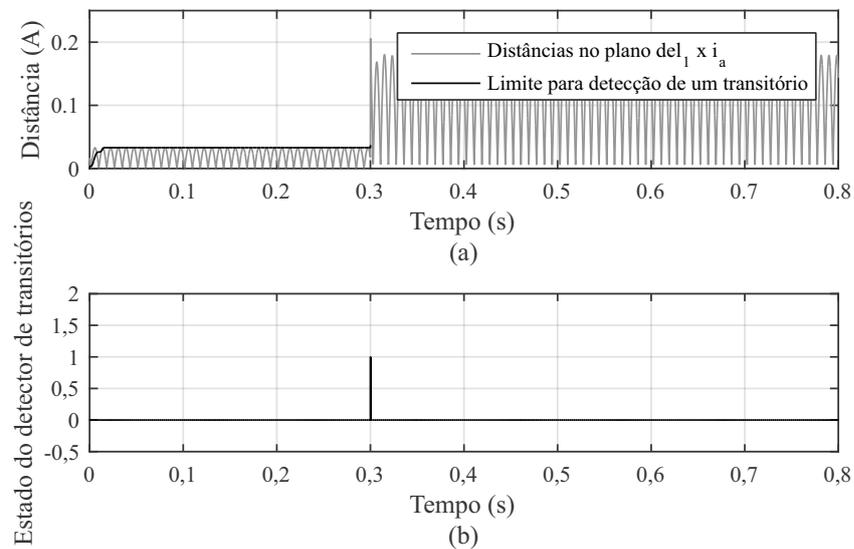
Fonte: Autor.

sinal de corrente do alimentador gerado pelo curto-circuito. Para este caso, como era esperado, o algoritmo atua de forma correta, não classificando o evento como uma falta de alta impedância.

Figura 43 – Forma de onda da corrente resultante do curto-circuito monofásico do quinto caso.



Fonte: Autor.

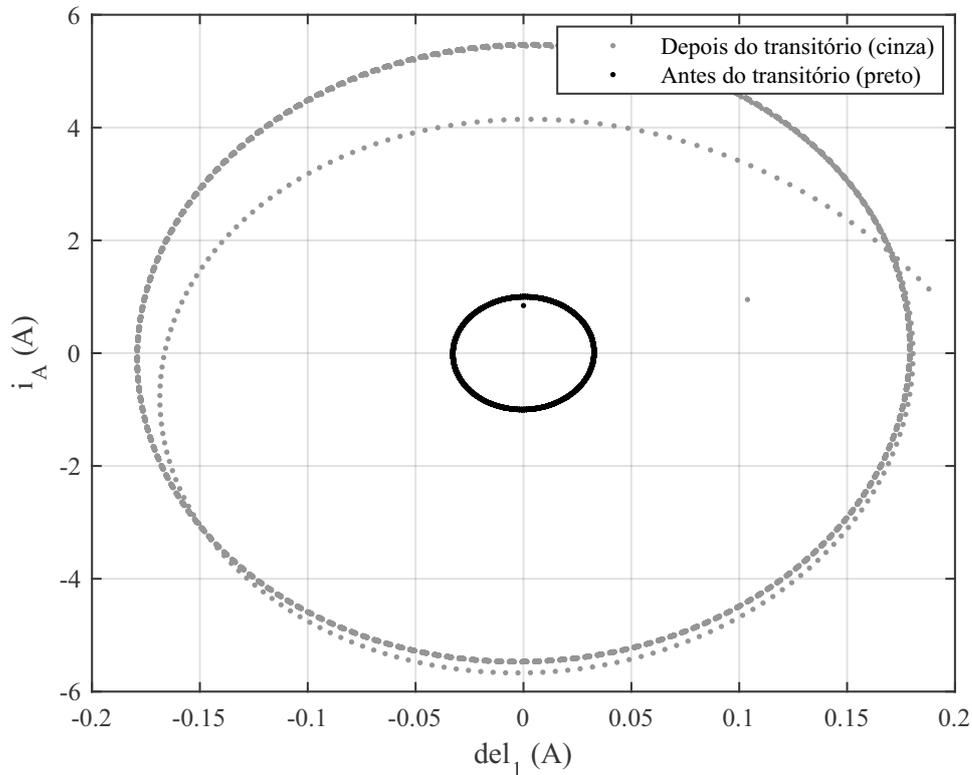
Figura 44 – Atuação do detector de transitórios para um curto-circuito monofásico. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.

Fonte: Autor.

4.4.6 Caso 6 - Energização de um Transformador

Como já mencionado no Capítulo 2, o processo de energização de transformadores pode gerar transitórios que afetam a qualidade de energia, os quais são conhecidos como correntes de *inrush*. Uma vez que é um processo comum à operação de distribuição de energia, faz-se interessante sua simulação para testar a técnica proposta, uma vez que esta não pode atuar indevidamente, identificando este tipo de evento como FAI. A modelagem dos transformadores

Figura 45 – Distribuição dos pontos no plano $del_1(A) \times i_A$ antes e depois da ocorrência do curto-circuito monofásico no quinto caso.



Fonte: Autor.

simulados neste trabalho foram realizadas utilizando os parâmetros especificados no trabalho de Farias (2013), que utiliza bloco TRAFO_S do software *EMTP-ATP* para tal finalidade.

Nesse caso, são apresentados os resultados obtidos para a simulação da energização de um transformador trifásico com potência nominal de 300kVA no Ponto 1 do sistema teste, de modo a demonstrar o comportamento da técnica proposta frente a esse tipo de evento.

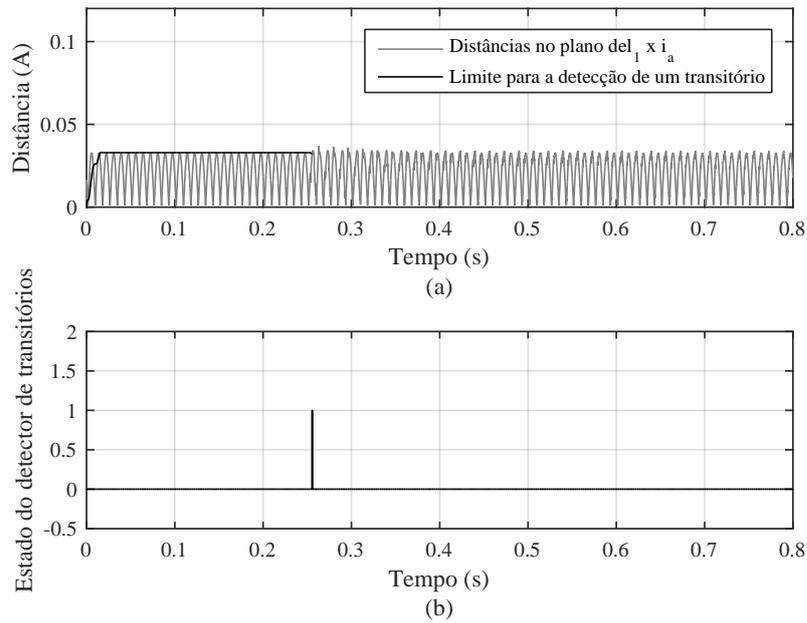
Durante a simulação, o algoritmo detectou um evento transitório, embora a variação tenha sido relativamente pequena, conforme mostrado na Figura 46, onde é possível observar a atuação do detector de transitórios.

Uma vez que o comportamento do sinal da corrente após a ocorrência do transitório causado pela energização do transformador se difere quando comparado a uma falta de alta impedância, o algoritmo apenas realizou a verificação, sem sinalizar falsamente a ocorrência de uma FAI, como apresentado na Figura 47.

4.4.7 Caso 7 - Chaveamento de Banco de Capacitores

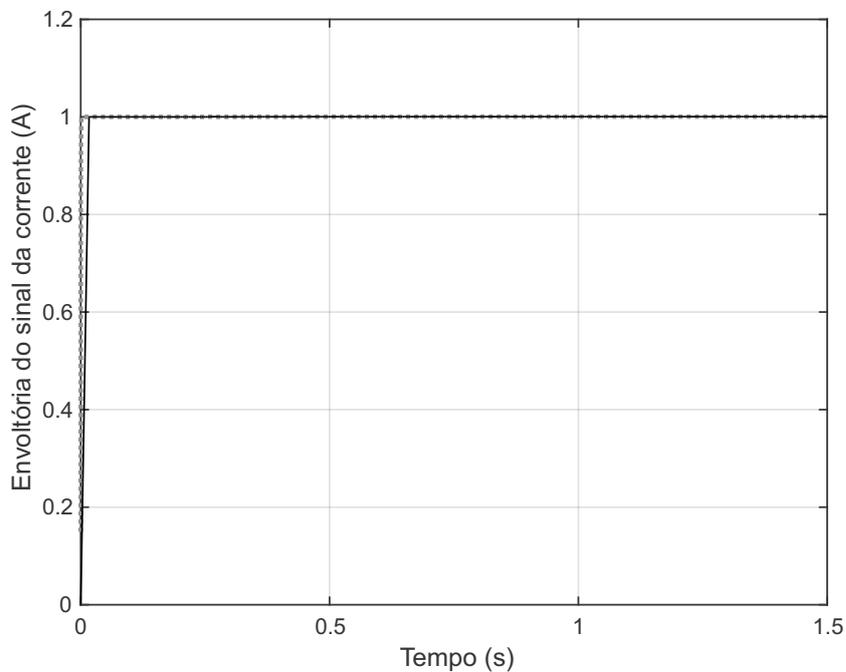
Como também foi mencionado no Capítulo 2, o chaveamento de banco de capacitores em derivação provocam oscilações transitórias de tensão e corrente. Como é um evento que acontece com muita frequência e em diversos pontos de um sistema de distribuição, sua simulação se torna importante, afim de verificar se a técnica proposta não atua erradamente, apontando

Figura 46 – Atuação do detector de transitórios para o caso de energização de um transformador. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.



Fonte: Autor.

Figura 47 – Detector da envoltória do sinal de corrente no caso de energização de um transformador.



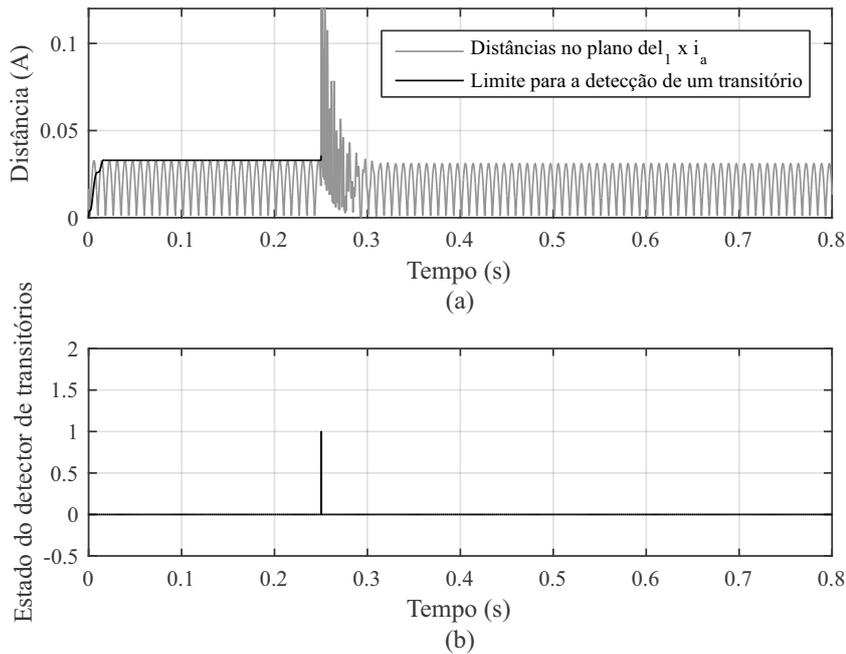
Fonte: Autor.

a ocorrência de uma falsa FAI. As simulações foram realizadas no *EMTP-ATP* utilizando os parâmetros modelados no trabalho de Farias (2013), para as potências de 600 kVAR e 900 kVAR.

Aqui, optou-se por apresentar os resultados para o chaveamento do banco de capacitor de 900 kVAR no ponto 5 do sistema teste.

Durante a simulação deste caso, o algoritmo detectou corretamente o transitório proveniente do chaveamento do banco de capacitores, como ilustra a atuação do detector de transitórios, a qual é mostrada na Figura 48.

Figura 48 – Atuação do detector de transitórios para o caso de chaveamento de banco de capacitor. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano $del_1(A) \times i_A$. (b) Estado do detector.



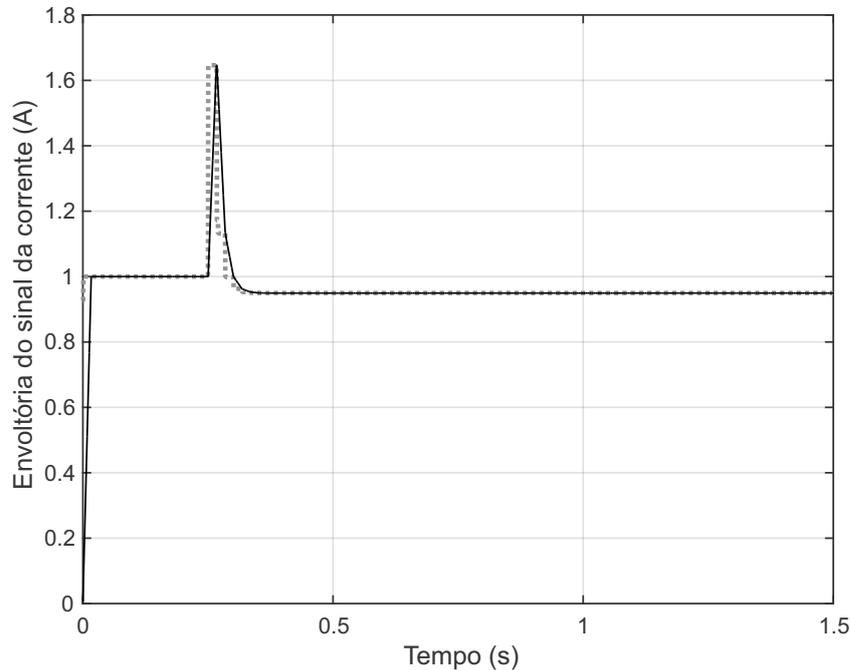
Fonte: Autor.

Como houve um pico de corrente após o transitório, o detector da envoltória do sinal de corrente não iniciou o processo de verificação de FAI e, portanto, não detectou nenhuma falsa FAI. A atuação do detector de envoltória do sinal de corrente, para este caso, pode ser vista na Figura 49.

4.5 Comparativo da Técnica Proposta com a Técnica da Corrente de Sequência Negativa

A Técnica da Corrente de Sequência Negativa, proposta por Oliveira (2013), foi escolhida para fins de comparação de desempenho com a técnica proposta neste trabalho, uma vez que se assemelha com a mesma no sentido de que utiliza os dados de leitura das correntes do TCs da subestação, diferentemente da maioria da técnicas existentes na literatura, as quais buscam identificar padrões de componentes harmônicos causados pelas FAIs. Além disso, é a técnica mais comumente usada para detecção desse tipo de falta, quando se opta por destinar uma proteção específica para este fim. Ressalta-se que, embora sua aplicabilidade usual, a mesma não é adotada amplamente, em consequência do elevado custo de implantação desse sistema.

Figura 49 – Detector da envoltória do sinal de corrente para o caso de chaveamento de banco de capacitor.



Fonte: Autor.

Sendo assim, para todas as simulações realizadas para validar a técnica proposta neste trabalho, também foi simulada a técnica das correntes de sequência negativa elaborada por Oliveira (2013). A implementação foi realizada no ambiente MATLAB[®] e ajustada para o mesmo sistema teste. O ajuste foi realizado para que a técnica de Oliveira (2013) detectasse as FAIs diante das características de carga do alimentador na qual foi testada. Os resultados das simulações estão dispostos na Tabela 3 do Apêndice A. Para o ajuste feito, a técnica da corrente de sequência negativa acabou atuando falsamente nos casos de entrada e saída de cargas. Para que não atuasse falsamente, um novo ajuste deveria ser realizado. Entretanto, com um ajuste diferente, parte dos casos de FAIs não seriam detectados. Ressalta-se também que nos casos simulados de FAIs, a técnica proposta neste trabalho identificou o evento de maneira mais rápida do que a técnica das correntes de sequência negativa.

4.6 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 cento e setenta e sete casos de simulações. Porém, devido à semelhança entre os resultados, foram detalhados apenas sete 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. A técnica proposta identificou FAIs em todos os pontos do sistema teste utilizado, atuando corretamente em todos os casos com amostragem de 192 amostras/ciclo. Para a taxa de 128 amostras/ciclo, a técnica proposta não identificou a FAI em doze casos. Todavia, o algoritmo não gerou nenhuma atuação indevida. Em comparação com a técnica das correntes de sequência negativa, a técnica proposta se mostrou mais confiável e mais veloz.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho apresenta 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 que utilizam redes aéreas, 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 e equipamentos, 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 a grande maioria dos 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 detalhadas as atuações da técnica proposta em outros casos, para testar o algoritmo em situações transitórias nas quais a metodologia pudesse vir a atuar indevidamente. Assim, a técnica proposta foi testada também para casos de entradas e saídas de cargas significativas, curto-circuito monofásico, energização de transformadores e chaveamento de banco de capacitores. Para essas condições, o algoritmo também atuou corretamente, não classificando esses transitórios como FAI.

Para fins de comparação de desempenho, foi implementada uma técnica existente na literatura que busca a detecção de FAIs pelo monitoramento da amplitude das correntes de sequência negativa medidas na subestação. Com os resultados, pode-se perceber uma ligeira vantagem da técnica proposta com relação a velocidade na detecção de FAIs. A técnica desenvolvida neste trabalho também se mostrou mais robusta com relação à falsas detecções, pois não atuou falsamente em nenhum caso, enquanto a outra técnica acabou atuando falsamente nos casos de entradas e saídas de cargas, já que necessita de ajustes manuais quando mudam as características de cargas dos alimentadores.

Por fim, como o algoritmo demonstrou desempenho satisfatório, pode-se dizer que o mesmo 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:

- Desenvolver um localizador de falta;
- Desenvolver um metodologia que utilize a técnica proposta em conjunto com outra técnica que identifica FAIs pelo conteúdo harmônico;
- Comparar a metodologia proposta com outras já existentes; e
- Verificar o desempenho da metodologia frente a condições de geração distribuída.

REFERÊNCIAS

ABB. **Disjuntor de média tensão**. 2019. Disponível em: <<https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-ovb-sdb>>. Acesso em: 27 nov. 2019. Citado na página 37.

ANDERSON, N. P. **Power System Protection**. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 1998. 1330 p. Citado na página 48.

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. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/484010>>. Acesso em: mar. 2017. Citado na página 31.

BRUMATTI, M. **Redes neurais artificiais**. Vitória, ES, 2005. Departamento de Engenharia elétrica - Universidade Federal do Espírito Santo. Citado na página 25.

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. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1413315>>. Acesso em: out. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

DISTRIBUIÇÃO, E. C. de. Proteção de sistemas aéreos de distribuição. **Centrais Elétricas Brasileiras–Eletrobrás–Rio de Janeiro, Campus Eletrobrás**, 1982. Citado na página 33.

ELDIN, A. H.; ABDALLAH, E.; MOHAMED, N. Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks using discrete wavelet transform. In: 22ND INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED 2013), Recife. **Proceedings of the [...]**. Stockholm: IET, 2013. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2013.0608>>. Acesso em: fev. 2014. Citado na página 25.

ELKALASHY, N. I. et al. 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. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4150605>>. Acesso em: out. 2014. Citado na página 23.

EMANUEL, A. et al. 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. Disponível em: <<https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/55235211/1.pdf?response-content-disposition>>. Acesso em: out. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 32.

FARIAS, P. E. **Detecção e classificação de transitórios em redes de distribuição para identificação de faltas de alta impedância**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/8520>>. Acesso em: nov. 2014. Citado 6 vezes nas páginas 25, 31, 32, 51, 68 e 69.

GAUTAM, S.; BRAHMA, S. M. Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 28, n. 2, p. 1226–1234, 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6311450>>. Acesso em: mar. 2018. Citado na página 26.

GUERRA, F. d. C. F.; ARAÚJO, L. d. L.; MEDEIROS, L. D. C. d. Correntes transitórias de magnetização em transformadores de potência. In: VII CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. **Anais do [...]**. Blumenau: SBQEE, 2009. Disponível em: <<https://http://sbqee.org.br/sbqee/artigos/>>. Acesso em: abr. 2017. Citado na página 30.

HUBBELL POWER SYSTEMS. **Chave fusível de distribuição**. 2019. Disponível em: <<http://www.delmar.com.br/PDF/DHC.PDF>>. Acesso em: 29 nov. 2019. Citado na página 35.

KAVI, M.; MISHRA, Y.; VILATHGAMUWA, M. D. High-impedance fault detection and classification in power system distribution networks using morphological fault detector algorithm. **IET Generation, Transmission & Distribution**, IET, v. 12, n. 15, p. 3699–3710, 2018. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2017.1633>>. Acesso em: set. 2019. Citado na página 26.

KIZILCAY, M.; SETA, P. L. Digital simulation of fault arcs in medium-voltage distribution networks. In: 15TH POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE. **Proceedings of the [...]**. Liege: PSCC, 2005. p. 22–26. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/1501/5626181cfbd66206190a7f80f6817bb7025e.pdf>>. Acesso em: dez. 2014. Citado na página 22.

MARTINHO, E. Distúrbios da energia elétrica. **Editora Erica**, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

MICHALIK, M. et al. 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. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1705533>>. Acesso em: fev. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 25, 39 e 40.

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. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-15122006-103128/en.php>>. Acesso em: nov. 2014. Citado 9 vezes nas páginas 23, 32, 33, 34, 46, 52, 53, 54 e 55.

NAM, S. et al. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in emp. In: 2001 POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING. CONFERENCE PROCEEDINGS (CAT. NO. 01CH37262). **Proceedings of the [...]**. Vancouver: IEEE, 2001. v. 2, p. 1175–1180. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/969969>>. Acesso em: mai. 2017. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 46.

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. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3128>>. Acesso em: jan. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.

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. Disponível em: <<https://jcis.sbrc.org.br/jcis/article/view/478>>. Acesso em: mar. 2014. Citado na página 25.

OLIVEIRA, J. G. S. M. de. Modelagem e detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia. 2013. Disponível em: <<https://s3.amazonaws.com/academia.edu>>.

documents/32132017>. Acesso em: jun. 2018. Citado 6 vezes nas páginas 26, 46, 47, 48, 70 e 71.

SANTOS, C. J. d. **Transitórios originados pelo chaveamento de bancos de capacitores da concessionária em um sistema elétrico de distribuição**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-01112017-111100/en.php>>. Acesso em: fev. 2018. Citado na página 30.

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**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/8489>>. Acesso em: mai. 2015. Citado na página 43.

S&C ELETRIC COMPANY. **Seccionador automático de distribuição**. 2019. Disponível em: <<https://www.sandc.com/pt/produtos-e-servicos/produtos/sistemas-de-seccionamento-scada-mate/>>. Acesso em: 25 nov. 2019. Citado na página 36.

SCHNEIDER ELETRIC. **Religador automático de distribuição**. 2019. Disponível em: <https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=U-Series+Manual_PT.pdf&p_Doc_Ref=religador_trifasico_serie_u_adv>. Acesso em: 01 dez. 2019. Citado na página 35.

SEDIGHI, A. A new model for high impedance fault in electrical distribution systems. **International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering**, v. 2, n. 4, p. 6–12, 2014. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/63bd/36e01ebc32e6b204a5d598f1c264d74ad9b3.pdf>>. Acesso em: out. 2014. Citado na página 24.

SHEBL, K. M.; BADRAN, E. A.; ABDALLA, E. A combined models-tacs atpdraw general model of the high impedance faults in distribution networks. In: 14TH INTERNATIONAL MIDDLE EAST POWER SYSTEMS CONFERENCE. **Proceedings of the [...]**. Egypt: MEPCON, 2010. v. 10, p. 19–21. Disponível em: <<https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/59990263/>>. Acesso em: dez. 2014. Citado na página 24.

TORRES, G.; RUIZ, P. High impedance fault detection using discrete wavelet transform. In: ELECTRONICS, ROBOTICS AND AUTOMOTIVE MECHANICS CONFERENCE (CERMA). **Proceedings of the [...]**. Morelia: IEEE, 2011. p. 325–329. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6125851>>. Acesso em: set. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 25, 37, 38 e 39.

VIEIRA, F. L. et al. High impedance fault detection and location in distribution networks using smart meters. In: 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP). **Proceedings of the [...]**. Ljubljana: IEEE, 2018. p. 1–6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8378825>>. Acesso em: ago. 2018. Citado na página 26.

VIJAYACHANDRAN, G.; MATHEW, B. High impedance arcing fault detection in mv networks using discrete wavelet transform and artificial neural networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN TECHNOLOGIES (ICGT). **Proceedings of the [...]**. Trivandrum: IEEE, 2012. p. 089–098. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6477953>>. Acesso em: mar. 2014. Citado na página 25.

WESTER, C. G. High impedance fault detection on distribution systems. In: RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE PRESENTED AT 42ND ANNUAL CONFERENCE. **Proceedings of the [...]**. St. Louis: IEEE, 1998. p. c5-1. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/666955>>. Acesso em: dez. 2014. Citado na página 31.

Apêndices

APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção está disposto, em forma de tabela, os dados dos casos simulados, tais como: tipo de evento, ponto simulado no sistema teste, valor resistência inicial da FAI, instante da ocorrência do evento transitório, taxa de amostragem, resposta do detector de FAIs e instante da detecção do evento. Especialmente no caso de número 147 foi testada uma taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo, a fim de verificar a influência do uso de uma taxa de amostragem superior a 192 amostras por ciclo. Com isso, verificou-se que taxas superiores ao citado, não melhoram o desempenho da técnica proposta.

Tabela 3 – Resultados obtidos.

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Deteccção de FAI	Instante da deteccção (s)	Deteccção de FAI	Instante da deteccção(s)
1	Entrada Carga	-	-	L1	0,3000	128	Não	-	Sim	-
2	Entrada Carga	-	-	L1	0,3000	192	Não	-	Sim	-
3	Entrada Carga	-	-	L1	0,2200	128	Não	-	Sim	-
4	Entrada Carga	-	-	L1	0,2200	192	Não	-	Sim	-
5	Entrada Carga	-	-	L1	0,2700	128	Não	-	Sim	-
6	Entrada Carga	-	-	L1	0,2700	192	Não	-	Sim	-
7	Entrada Carga	-	-	L2	0,3000	128	Não	-	Sim	-
8	Entrada Carga	-	-	L2	0,3000	192	Não	-	Sim	-
9	Entrada Carga	-	-	L2	0,2200	128	Não	-	Sim	-
10	Entrada Carga	-	-	L2	0,2200	192	Não	-	Sim	-
11	Entrada Carga	-	-	L2	0,2700	128	Não	-	Sim	-
12	Entrada Carga	-	-	L2	0,2700	192	Não	-	Sim	-
13	Entrada Carga	-	-	L3	0,3000	128	Não	-	Sim	-
14	Entrada Carga	-	-	L3	0,3000	192	Não	-	Sim	-
15	Entrada Carga	-	-	L3	0,2200	128	Não	-	Sim	-
16	Entrada Carga	-	-	L3	0,2200	192	Não	-	Sim	-
17	Entrada Carga	-	-	L3	0,2700	128	Não	-	Sim	-
18	Entrada Carga	-	-	L3	0,2700	192	Não	-	Sim	-
19	Entrada Carga	-	-	L4	0,3000	128	Não	-	Sim	-

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Detecção de FAI	Instante da detecção (s)	Detecção de FAI	Instante da detecção(s)
20	Entrada Carga	-	-	L4	0,3000	192	Não	-	Sim	-
21	Entrada Carga	-	-	L4	0,2200	128	Não	-	Sim	-
22	Entrada Carga	-	-	L4	0,2200	192	Não	-	Sim	-
23	Entrada Carga	-	-	L4	0,2700	128	Não	-	Sim	-
24	Entrada Carga	-	-	L4	0,2700	192	Não	-	Sim	-
25	FAI	1	100	-	0,2180	128	Sim	0,35142	Sim	0,36901
26	FAI	1	100	-	0,2180	192	Sim	0,36781	Sim	0,36877
27	FAI	1	100	-	0,2281	128	Sim	0,36784	Sim	0,37930
28	FAI	1	100	-	0,2281	192	Sim	0,36781	Sim	0,37910
29	FAI	1	250	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,36901
30	FAI	1	250	-	0,2180	192	Sim	0,36790	Sim	0,36877
31	FAI	1	250	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,37930
32	FAI	1	250	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,37910
33	FAI	1	350	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,36901
34	FAI	1	350	-	0,2180	192	Sim	0,36799	Sim	0,36877
35	FAI	1	350	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,37930
36	FAI	1	350	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,37910
37	FAI	1	450	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,36901
38	FAI	1	450	-	0,2180	192	Sim	0,36799	Sim	0,36877
39	FAI	1	450	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,37930

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Deteccção de FAI	Instante da detecccção (s)	Deteccção de FAI	Instante da detecccção(s)
40	FAI	1	450	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,37910
41	FAI	2	100	-	0,2180	128	Sim	0,35129	Sim	0,61345
42	FAI	2	100	-	0,2180	192	Sim	0,35123	Sim	0,60741
43	FAI	2	100	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,62218
44	FAI	2	100	-	0,2281	192	Sim	0,35141	Sim	0,61644
45	FAI	2	250	-	0,2180	128	Sim	0,35129	Sim	0,37800
46	FAI	2	250	-	0,2180	192	Sim	0,35132	Sim	0,37762
47	FAI	2	250	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,39155
48	FAI	2	250	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,39134
49	FAI	2	350	-	0,2180	128	Sim	0,35142	Sim	0,37787
50	FAI	2	350	-	0,2180	192	Sim	0,35132	Sim	0,37754
51	FAI	2	350	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,39129
52	FAI	2	350	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,39117
53	FAI	2	450	-	0,2180	128	Sim	0,35142	Sim	0,37774
54	FAI	2	450	-	0,2180	192	Sim	0,35132	Sim	0,37745
55	FAI	2	450	-	0,2281	128	Sim	0,36810	Sim	0,39116
56	FAI	2	450	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,39099
57	FAI	3	100	-	0,2180	128	Sim	0,36784	Sim	0,37031
58	FAI	3	100	-	0,2180	192	Sim	0,36781	Sim	0,37007
59	FAI	3	100	-	0,2281	128	Sim	0,36784	Sim	0,38412

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Detecção de FAI	Instante da detecção (s)	Detecção de FAI	Instante da detecção(s)
60	FAI	3	100	-	0,2281	192	Sim	0,36781	Sim	0,38387
61	FAI	3	250	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37018
62	FAI	3	250	-	0,2180	192	Sim	0,36790	Sim	0,36998
63	FAI	3	250	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,38399
64	FAI	3	250	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38439
65	FAI	3	350	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37018
66	FAI	3	350	-	0,2180	192	Sim	0,36799	Sim	0,36998
67	FAI	3	350	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,38399
68	FAI	3	350	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38379
69	FAI	3	450	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37018
70	FAI	3	450	-	0,2180	192	Sim	0,36799	Sim	0,36998
71	FAI	3	450	-	0,2281	128	Sim	0,36799	Sim	0,38399
72	FAI	3	450	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38379
73	FAI	4	100	-	0,2180	128	Sim	0,36784	Sim	0,37031
74	FAI	4	100	-	0,2180	192	Sim	0,36781	Sim	0,37007
75	FAI	4	100	-	0,2281	128	Sim	0,36784	Sim	0,38412
76	FAI	4	100	-	0,2281	192	Sim	0,36781	Sim	0,38387
77	FAI	4	250	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37018
78	FAI	4	250	-	0,2180	192	Sim	0,36790	Sim	0,36998
79	FAI	4	250	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,38399

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Deteccção de FAI	Instante da detecccção (s)	Deteccção de FAI	Instante da detecccção(s)
80	FAI	4	250	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38379
81	FAI	4	350	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37018
82	FAI	4	350	-	0,2180	192	Sim	0,36790	Sim	0,36998
83	FAI	4	350	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,38399
84	FAI	4	350	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38379
85	FAI	4	450	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37018
86	FAI	4	450	-	0,2180	192	Sim	0,36799	Sim	0,36998
87	FAI	4	450	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,38399
88	FAI	4	450	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38379
89	FAI	5	100	-	0,2140	128	Sim	0,35129	Sim	0,37383
90	FAI	5	100	-	0,2140	192	Sim	0,35123	Sim	0,37398
91	FAI	5	100	-	0,2180	128	Sim	0,36784	Sim	0,37683
92	FAI	5	100	-	0,2180	192	Sim	0,36781	Sim	0,37658
93	FAI	5	100	-	0,2281	128	Sim	0,36784	Sim	0,38686
94	FAI	5	100	-	0,2281	192	Sim	0,36790	Sim	0,38674
95	FAI	5	250	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37644
96	FAI	5	250	-	0,2180	192	Sim	0,36799	Sim	0,37623
97	FAI	5	250	-	0,2281	128	Sim	0,36784	Sim	0,38686
98	FAI	5	250	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38622
99	FAI	5	350	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37644

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Detecção de FAI	Instante da detecção (s)	Detecção de FAI	Instante da detecção(s)
100	FAI	5	350	-	0,2180	192	Sim	0,35132	Sim	0,37615
101	FAI	5	350	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,38634
102	FAI	5	350	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38613
103	FAI	5	450	-	0,2180	128	Sim	0,36797	Sim	0,37644
104	FAI	5	450	-	0,2180	192	Sim	0,35132	Sim	0,37615
105	FAI	5	450	-	0,2281	128	Sim	0,36797	Sim	0,38621
106	FAI	5	450	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,38604
107	FAI	6	100	-	0,2180	128	Não	-	Sim	0,55244
108	FAI	6	100	-	0,2180	192	Não	-	Sim	0,55220
109	FAI	6	100	-	0,2281	128	Não	0,36799	Sim	0,38604
110	FAI	6	100	-	0,2281	192	Não	-	Sim	0,56505
111	FAI	6	250	-	0,2180	128	Não	-	Sim	0,70126
112	FAI	6	250	-	0,2180	192	Não	-	Sim	0,70082
113	FAI	6	250	-	0,2281	128	Não	-	Sim	0,71063
114	FAI	6	250	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,71488
115	FAI	6	350	-	0,2180	128	Não	-	Sim	0,78172
116	FAI	6	350	-	0,2180	192	Não	-	Sim	0,78320
117	FAI	6	350	-	0,2281	128	Não	-	Sim	0,79136
118	FAI	6	350	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,79223
119	FAI	6	450	-	0,2180	128	Não	-	Sim	0,86518

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Deteccção de FAI	Instante da detecccção (s)	Deteccção de FAI	Instante da detecccção(s)
120	FAI	6	450	-	0,2180	192	Não	-	Sim	0,87340
121	FAI	6	450	-	0,2281	128	Não	-	Sim	0,86830
122	FAI	6	450	-	0,2281	192	Sim	0,36799	Sim	0,88216
123	Saída Carga	-	-	L1	0,3000	128	Não	-	Sim	-
124	Saída Carga	-	-	L1	0,3000	192	Não	-	Sim	-
125	Saída Carga	-	-	L1	0,2200	128	Não	-	Sim	-
126	Saída Carga	-	-	L1	0,2200	192	Não	-	Sim	-
127	Saída Carga	-	-	L1	0,2700	128	Não	-	Sim	-
128	Saída Carga	-	-	L1	0,2700	192	Não	-	Sim	-
129	Saída Carga	-	-	L2	0,3000	128	Não	-	Sim	-
130	Saída Carga	-	-	L2	0,3000	192	Não	-	Sim	-
131	Saída Carga	-	-	L2	0,2200	128	Não	-	Sim	-
132	Saída Carga	-	-	L2	0,2200	192	Não	-	Sim	-
133	Saída Carga	-	-	L2	0,2700	128	Não	-	Sim	-
134	Saída Carga	-	-	L2	0,2700	192	Não	-	Sim	-
135	Saída Carga	-	-	L3	0,3000	128	Não	-	Sim	-
136	Saída Carga	-	-	L3	0,3000	192	Não	-	Sim	-
137	Saída Carga	-	-	L3	0,2200	128	Não	-	Sim	-
138	Saída Carga	-	-	L3	0,2200	192	Não	-	Sim	-
139	Saída Carga	-	-	L3	0,2700	128	Não	-	Sim	-

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Detecção de FAI	Instante da detecção (s)	Detecção de FAI	Instante da detecção(s)
140	Saída Carga	-	-	L3	0,2700	192	Não	-	Sim	-
141	Saída Carga	-	-	L4	0,3000	128	Não	-	Sim	-
142	Saída Carga	-	-	L4	0,3000	192	Não	-	Sim	-
143	Saída Carga	-	-	L4	0,2200	128	Não	-	Sim	-
144	Saída Carga	-	-	L4	0,2200	192	Não	-	Sim	-
145	Saída Carga	-	-	L4	0,2700	128	Não	-	Sim	-
146	Saída Carga	-	-	L4	0,2700	192	Não	-	Sim	-
147	FAI	6	100	-	0,2180	256	Não	-	Sim	-
148	FAI	1	250	-	0,2708	128	Sim	0,41800	Sim	0,42478
149	FAI	1	250	-	0,2708	192	Sim	0,41790	Sim	0,42467
150	FAI	6	450	-	0,2708	128	Sim	0,41800	Sim	0,91497
151	FAI	6	450	-	0,2708	192	Sim	0,41799	Sim	0,92392
152	CC 1ph	5	-	-	0,3000	192	Não	-	Sim	-
153	Energização TR 25 kVA	1	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
154	Energização TR 75 kVA	1	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
155	Energização TR 300 kVA	1	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Deteccção de FAI	Instante da detecccção (s)	Deteccção de FAI	Instante da detecccção(s)
156	Chaveamento BC - 600 kVAr	1	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
157	Chaveamento BC - 900 kVAr	1	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
158	Energização TR 25 kVA	2	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
159	Energização TR 75 kVA	2	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
160	Energização TR 300 kVA	2	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
161	Chaveamento BC - 600 kVAr	2	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
162	Chaveamento BC - 900 kVAr	2	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
163	Energização TR 25 kVA	3	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
164	Energização TR 75 kVA	3	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
165	Energização TR 300 kVA	3	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Detecção de FAI	Instante da detecção (s)	Detecção de FAI	Instante da detecção(s)
166	Chaveamento BC - 600 kVAr	3	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
167	Chaveamento BC - 900 kVAr	3	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
168	Energização TR 25 kVA	4	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
169	Energização TR 75 kVA	4	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
170	Energização TR 300 kVA	4	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
171	Chaveamento BC - 600 kVAr	4	-	-	0,2200	192	Não	-	Não	-
172	Chaveamento BC - 900 kVAr	4	-	-	0,4100	192	Não	-	Não	-
173	Energização TR 25 kVA	5	-	-	0,4200	192	Não	-	Não	-
174	Energização TR 75 kVA	5	-	-	0,4300	192	Não	-	Não	-
175	Energização TR 300 kVA	5	-	-	0,4400	192	Não	-	Não	-

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Caso	Evento	Ponto	R de Falta (ohms)	Carga	Instante do evento(s)	Amostras por ciclo	Técnica proposta		Técnica Seq. Negativa	
							Deteção de FAI	Instante da deteção (s)	Deteção de FAI	Instante da deteção(s)
176	Chaveamento BC - 600 kVAr	5	-	-	0,4500	192	Não	-	Não	-
177	Chaveamento BC - 900 kVAr	5	-	-	0,4600	192	Não	-	Não	-