

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DANIELA MAIA BUENO

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO**

**Alegrete
2019**

DANIELA MAIA BUENO

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

**Alegrete
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) .

B928n Bueno, Daniela

Uma nova proposta para detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição de média tensão / Daniela Bueno.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2019.

"Orientação: Eduardo dos Santos".

1. Falta de alta impedância. 2. Detecção. 3. Arco Elétrico. 4. Fuzzy. 5. Envoltória. I. Título.

DANIELA MAIA BUENO

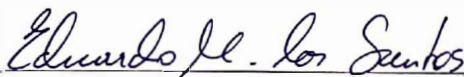
UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de junho de 2019.

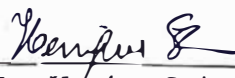
Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva
UNIPAMPA



Eng. Henrique Stein

*Dedico este trabalho à minha família,
em especial a pessoa mais importante
da minha vida: meu pai, José.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais José e Lurdes e minha irmã Laiana, por todo o amor, carinho e apoio em todas as minhas decisões. Sou imensamente grata por tudo que fizeram para que eu chegasse aonde estou hoje, e por não medirem esforços para tornar tudo isso possível.

Aos meus amigos Diego Brum, Eduarda Kottwitz e Rodolfo Londero por toda ajuda, companheirismo e momentos de descontração compartilhados. Aos amigos Felipe Lamaizon, Roberta Marques e Tailize Oliveira pela grande amizade, e aos demais amigos e colegas que tive a satisfação de conhecer e conviver durante esse período.

Ao professor Eduardo, pela oportunidade de trabalhar na iniciação científica e ser meu orientador nesse trabalho. Por todo o conhecimento e experiência transmitidos, pela dedicação e paciência em me guiar e contribuir na minha formação acadêmica.

Aos demais professores da universidade que de alguma forma contribuíram para a minha formação e à Universidade Federal do Pampa por todo o apoio e estrutura proporcionado.

À Deus pela vida e oportunidade de realizar esse trabalho.

“Existem apenas duas maneiras de viver a vida. Uma é como se nada fosse um milagre. A outra é como se tudo fosse um milagre”

Albert Einstein

RESUMO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica são suscetíveis a um problema grave e preocupante, denominado falta de alta impedância (FAI), proveniente do contato do condutor com determinada superfície de elevada resistência elétrica, com possível queda do condutor energizado. Esse contato se dá através de diversos fatores oriundos do mau funcionamento de equipamentos, bem como por objetos lançados na rede, catástrofes naturais e afins. Os equipamentos convencionais de proteção de sobrecorrente não são capazes de detectar esse tipo de fenômeno, visto que os níveis de corrente gerados são insuficientes para a sensibilização dos mesmos, oferecendo um alto grau de periculosidade às pessoas e animais que venham a passar no local, além de possíveis riscos de incêndios em propriedades. Diante disso, muitas pesquisas vêm sendo feitas para desenvolver metodologias capazes de detectar as FAIs. Entretanto, a detecção desse tipo de evento mostra-se como um problema ainda em aberto na literatura, não existindo um método completamente robusto e economicamente viável. Dessa forma, este trabalho propõe uma nova técnica para detecção de FAIs através da extração das características das correntes amostradas na subestação de energia. Essa técnica, conta com um sistema de inferência Fuzzy que avalia tais características e faz a classificação das FAIs. Com o auxílio do software EMTP-ATP®, o conjunto de dados necessários para desenvolver o método foi alcançado através da simulação de um alimentador radial acoplado a um modelo de arco elétrico capaz de representar as reais características desse tipo de falta. Obtidas as oscilografias das correntes, a detecção é feita por meio de alguns cálculos algébricos que identificam a existência de anormalidades nos sinais, estes que, em seguida, são analisados e classificados através da lógica nebulosa (Fuzzy). Após essa detecção, é feita uma análise da envoltória do sinal, para que casos de curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico sejam diferenciados de possíveis casos de FAI. O algoritmo proposto foi implementado no ambiente MATLAB®. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios uma vez que a técnica proposta classificou corretamente a ocorrência de faltas de alta impedância em todos os casos analisados, além de discriminar esses eventos de outros casos de curto-circuito, provando que a metodologia proposta neste trabalho é robusta e viável para aplicação em tempo real.

Palavras-Chave: Sistemas de distribuição, Falta de Alta Impedância, Detecção, Arco Elétrico, Fuzzy, Envoltória.

ABSTRACT

Electric power distribution systems are susceptible to a serious and worrying problem, called high impedance fault (HIF), coming from the contact of the conductor with a certain surface of high electrical resistance, with possible falling of the energized conductor. This contact occurs through several factors resulting from equipment malfunctions, as well as by objects thrown at the network, natural disasters and the like. Conventional overcurrent protection equipment is not capable of detecting this type of phenomenon, since current levels generated are insufficient to sensitize them, offering a high degree of danger to people and animals that come to the site, in addition to possible fire hazards on property. Given this, many researches have been done to develop methodologies capable of detecting HIFs. However, the detection of this type of event is still an open problem in the literature, and there is no completely robust and economically viable method. Thus, this work proposes a new technique for the detection of HIFs by extracting the characteristics of the currents sampled in the energy substation. This technique has a Fuzzy inference system that evaluates these characteristics and makes the classification of HIFs. With the help of the EMTP-ATP® software, the set of data needed to develop the method was achieved by simulating a radial feeder coupled to an electric arc model capable of representing the real characteristics of this type of fault. Once the oscillographs of the currents are obtained, the detection is done through some algebraic calculations that identify the existence of abnormalities in the signals, which are then analyzed and classified through fuzzy logic. After this detection, an analysis of the signal envelope is made, so that cases of single-phase, two-phase and three-phase short-circuits are differentiated from possible cases of HIF. The proposed algorithm was implemented in the MATLAB® environment. The results obtained were satisfactory since the proposed technique correctly classified the occurrence of high impedance faults in all analyzed cases, as well as to discriminate these events from other short-circuit cases, proving that the methodology proposed in this work is robust and feasible for real-time application.

Keywords: High Impedance Fault, Distribution Networks, Protection, Detection, Electric Arc, Fuzzy, Envelope.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de resistências variáveis controladas por TACS.....	28
Figura 2 – Modelo de Arco de Emanuel.....	29
Figura 3- Sinal de um transitório oscilatório.....	34
Figura 4 - Forma de onda da corrente de uma FAI	36
Figura 5 - Fase de <i>buildup</i> e <i>shoulders</i>	37
Figura 6 - Sensor de corrente em uma rede de distribuição.	40
Figura 7- Função de pertinência triangular.....	41
Figura 8- Sistema Fuzzy.....	42
Figura 9- Fluxograma da metodologia proposta.....	46
Figura 10- Forma de onda senoidal discretizada.....	47
Figura 11- Especificação do parâmetro $\Delta I_{m\acute{a}x}$	49
Figura 12- Envoltória de um sinal de corrente em FAI na fase A.....	50
Figura 13- Envoltória de um sinal de corrente em curto-circuito monofásico.....	50
Figura 14 – Valores máximos de corrente para um sinal de corrente de curto-circuito.....	51
Figura 15 – Valores máximos de corrente para um sinal de corrente em FAI.....	52
Figura 16 – Comportamento do método da envoltória para um caso de curto-circuito.....	53
Figura 17 - Comportamento do método da envoltória para um caso de FAI.....	54
Figura 18 – Oscilografia de corrente trifásica com FAI na fase A.....	56
Figura 19 - Modelo de arco elétrico com diodos antiparalelos.	59
Figura 20 - Correntes de FAI simuladas.....	62
Figura 21 – Sistema Teste para simulação de FAIs.....	63
Figura 22 – Sistema de teste para simulação de curtos-circuitos.....	63
Figura 23 – Sinais de corrente para um curto-circuito monofásico.....	64
Figura 24 - Sinais de corrente para um curto-circuito bifásico.	64
Figura 25 - Sinais de corrente para um curto-circuito trifásico.....	65
Figura 26 – Detecção de uma FAI na fase A.....	66
Figura 27 – Classificação de uma FAI na fase A.	67
Figura 28 – Característica da envoltória de uma FAI na fase A.....	67
Figura 29 - Detecção de uma FAI na fase B.....	68
Figura 30 - Classificação de uma FAI na fase B.	68
Figura 31 - Característica da envoltória de uma FAI na fase B.	69
Figura 32 - Detecção de uma FAI na fase C.....	70
Figura 33 - Classificação de uma FAI na fase C.....	70

Figura 34 - Característica da envoltória de uma FAI na fase C.	71
Figura 35 – Sistema operando em condição normal.....	72
Figura 36 – Envoltória do sinal de corrente do sistema operando normalmente.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correntes de FAI para diferentes tipos de superfície.	35
Tabela 2 – Valores dos vértices do conjunto nebuloso	56
Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de FAI e seus arcos.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- FAI - Falta de Alta Impedância;
- TACS - Transient Analysis of Control Systems;
- ATP - Alternative Transients Program;
- EMTP - The Electromagnetic Transients Program;
- TWD - Transformada Wavelet Discreta;
- IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos;
- FFT - Fast Fourier Transform;
- TW - Transformada Wavelet;
- RNA - Rede Neural Artificial;
- MATLAB - Matrix Laboratory;
- PLL - Phase Locked Loop;
- GRNN - Generalized Regression Neural Network;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Considerações Gerais.....	25
1.2	Motivação	25
1.3	Objetivos	26
1.4	Estado-da-Arte.....	26
1.4.1	Modelos para a representação do arco elétrico	26
1.4.2	Metodologias para a detecção e classificação das FAIs	29
1.5	Estrutura do Trabalho	31
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	33
2.1	Considerações Gerais.....	33
2.2	Transitórios em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	33
2.3	Faltas de Alta Impedância.....	34
2.4	Dispositivos de Proteção em Redes Aéreas de Distribuição	37
2.4.1	Elos Fusíveis.....	37
2.4.2	Religadores Automáticos.....	38
2.4.3	Seccionador Automático	38
2.4.4	Disjuntores Associados com Relés	38
2.5	Métodos Existentes para a detecção de FAIs	39
2.6	Lógica Fuzzy ou Nebulosa	40
2.7	Considerações Finais.....	42
3	METODOLOGIA PROPOSTA	45
3.1	Considerações Gerais.....	45
3.2	Identificação da Anomalia	47
3.3	Análise da Envoltória	49
3.4	Classificação de FAIs	54
3.5	Considerações Finais.....	56
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	59
4.1	Considerações Gerais.....	59
4.1.1	Modelo Computacional	59

4.2	Sistema teste de simulação de uma FAI	62
4.3	Sistema teste de simulação de um curto-circuito.....	63
4.4	Análise dos Resultados	65
4.4.1	Caso 1: FAI na fase A	66
4.4.2	Caso 2: FAI na fase B.....	67
4.4.3	Caso 3: FAI na fase C.....	69
4.4.4	Caso 4: Operação Normal do Sistema	71
4.5	Considerações Finais.....	72
5	CONCLUSÕES.....	75
5.1	Conclusões.....	75
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

As redes de distribuição de energia elétrica, na maioria das regiões do Brasil, são constituídas predominantemente de ramais aéreos, os quais se encontram constantemente expostos às ações do tempo, da população e de causas naturais. Essas ações, sejam elas por descargas atmosféricas, acidentes, contato de animais e objetos, ou defeitos em equipamentos, podem causar a ocorrência de curto-circuito nas redes elétricas. Tais eventos sempre foram motivos de estudos e preocupação para os engenheiros e às concessionárias, visto que dependem de um sistema de proteção seguro e confiável para a sua detecção.

Com o passar dos anos, os sistemas de proteção progrediram, integrando novas tecnologias e equipamentos, melhorando consideravelmente a confiabilidade das redes de distribuição. Entretanto, ainda existe uma situação em que os dispositivos de proteção não são sensibilizados, denominada Falta de Alta Impedância (FAI), que ocorre quando um condutor da rede de distribuição de média tensão, rompido ou não, entra em contato com alguma superfície de elevada resistência elétrica. Nessa situação, a corrente de falta não apresenta variações expressivas, conseqüentemente, a proteção não atua e o condutor permanece energizado.

1.2 Motivação

As FAIs são caracterizadas principalmente pela presença do arco elétrico e, também, por apresentarem uma corrente de falta muito baixa, sendo que, em alguns casos, apresentam valores inferiores a corrente de carga, o que torna impossível a sua detecção através dos sistemas convencionais de proteção (relés e fusíveis). Dessa forma, o condutor permanece energizado e, na maioria das vezes, rompido, apresentando riscos à vida de pessoas e animais, os quais correm risco de sofrer choque elétrico, além da possibilidade de incêndio, causando danos às propriedades e à concessionária. Ainda, destaca-se que, para que a situação seja corrigida, é preciso que a concessionária seja informada por intermédio de terceiros, resultando na demora da solução e na perda da continuidade do sistema.

A detecção e localização de FAIs ainda é um problema em desenvolvimento na literatura e um grande desafio às concessionárias, em virtude da complexidade das malhas elétricas envolvidas. Com o intuito de reduzir o tempo em que o condutor rompido permanece energizado e também os riscos atribuídos a ele, diversos trabalhos têm sido realizados com o

intuito de divulgar e desenvolver novas técnicas para a detecção de FAIs. Mas, apesar das intensas pesquisas, ainda não existe uma alternativa totalmente confiável e segura.

1.3 Objetivos

Diante da necessidade de solucionar os problemas de detecção e eliminação das FAIs, a fim de evitar danos e prejuízos tanto para o consumidor quanto para a concessionária, vê-se a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que ajudem no estudo da eficiência dos sistemas de proteção e no desenvolvimento de dispositivos que atuem de forma rápida e precisa.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo específico apresentar os modelos de representação e técnicas de detecção de FAIs existentes na literatura, além de uma detalhada abordagem sobre as faltas de alta impedância. O objetivo principal consiste na proposta de uma nova técnica de detecção e classificação de faltas de alta impedância.

1.4 Estado-da-Arte

Nas duas últimas décadas, diversos trabalhos, os quais serão descritos nas Subseções seguintes, têm sido desenvolvidos para se obter uma boa representação de uma FAI. Para isso, é necessário o desenvolvimento de um modelo que apresente os comportamentos não lineares e assimétricos característicos dessas faltas. Além do modelamento do comportamento das FAIs, técnicas relacionadas à sua detecção e classificação, com a intenção de aumentar a segurança e a confiabilidade dos sistemas de distribuição, também têm sido desenvolvidas ao longo dos anos, conforme discutido a seguir.

1.4.1 Modelos para a representação do arco elétrico

Um modelo de representação da instabilidade do arco foi proposto por Nam et al. (2001), composto por duas resistências variáveis controladas por TACS (Transient Analysis of Control Systems), onde a simulação do arco elétrico é estabelecida por meio de um gerador de sinais randômicos utilizando a função *MODELS* do *software* EMTP-ATP®. Nesse modelo, os valores da tensão de arco e do período de extinção são escolhidos aleatoriamente entre valores pré-estabelecidos. Além disso, o modelo conta com duas resistências variantes no tempo, as quais representam a impedância de curto, sendo que uma delas é empregada para produzir as distorções da forma de onda (gerada pela não linearidade da resistência do arco gerado no solo) e a assimetria entre os semiciclos, e a outra, para a modelagem da fase de *buildup*.

Um modelo simplificado de falta de alta impedância é proposto por Sheng e Rovnyak (2004), integrado por um resistor não linear, dois diodos e duas fontes de corrente contínua que alteram suas amplitudes aleatoriamente a cada meio ciclo.

Além disso, em Kizilcay e Seta (2005), foi simulado de forma digital um arco elétrico em uma rede de 10 kV com compensação de corrente de falta capacitiva à terra, via bobina de Peterson, conectada ao ponto de neutro da rede. Este modelo permite a realização de estudos sobre a interação do arco de falta à terra com o sistema de energia elétrica. Se a bobina estiver com o ajuste adequado, a corrente de falta se torna mínima, resultando na extinção do arco. Para isso, há a necessidade de uma representação confiável das características dinâmicas do arco, possibilitando o bom ajuste da bobina nas simulações.

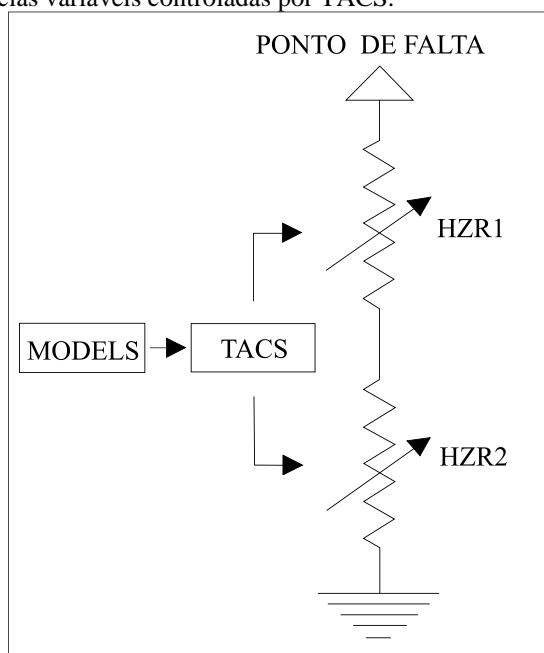
Para isso, o modelo utilizado foi representado por um bloco criado através da função *MODELS* no *software* EMTP-ATP® e é descrito por uma equação diferencial de primeira ordem, dada por (1). Onde τ é uma constante de tempo, G é a condutância estacionária e g é a condutância variável. O modelo mostrou-se satisfatório, uma vez que os resultados das simulações estão de acordo com os dados de testes de arcos realizados em laboratório.

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

Outra contribuição para modelo de arco elétrico em FAIs foi sugerida no trabalho de Nakagomi (2006), onde o modelo, representado pela Figura 1, é constituído de resistências variáveis conectadas em série, ambas monitoradas pela ferramenta *MODELS* do *software* EMTP-ATP®. Nesse modelo, a primeira resistência variável é responsável pelas distorções e assimetrias do formato de onda durante todos os ciclos da corrente de falta, características essas, típicas das faltas de alta impedância. Já a outra resistência, inicialmente, apresenta valor elevado que com o passar do tempo vai diminuindo, fazendo com que a corrente cresça, caracterizando a fase de *buildup*, também características dos sinais de corrente de faltas de alta impedância.

O referido modelo ainda conta com três chaves controladas por TACS. Uma das chaves define se a falta ocorre do lado da fonte e a outra, se a falta ocorre no lado da carga e, por fim, a terceira chave faz o controle do tempo que o condutor demora até chegar ao solo, sendo este tempo um valor fixo e equivalente a 1,3 segundos.

Figura 1 – Modelo de resistências variáveis controladas por TACS.



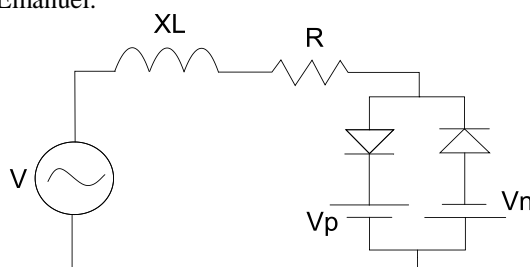
Fonte: Stein (2015).

No trabalho exposto em Elkalashy et al. (2006), foi modelada e verificada experimentalmente uma FAI ocorrida em consequência da inclinação de uma árvore sobre uma rede de média tensão. O experimento foi realizado em laboratório a partir da energização do enrolamento secundário de um transformador, onde o seu lado de alta tensão foi conectado a um barramento, no qual foram encostados os galhos de uma árvore com tronco aterrado. O arco é gerado entre o barramento e o ponto de contato, já a resistência da árvore limita a corrente de falta. A modelagem foi baseada em equações térmicas, utilizando o modelo de arco universal visto em Darwish e Elkalashy (2005). Os parâmetros do modelo de arco e os valores de resistência são determinados a partir de resultados experimentais e são simulados no *software* EMTP-ATP®. Além disso, utilizou-se a Transformada Wavelet Discreta (TWD) para extrair as características da falta, a fim de verificar seu conteúdo harmônico.

Baseado no modelo universal do arco, em Shebl et al. (2010), também foi proposto para a simulação do arco elétrico o arranjo entre *MODELS* e *TACS* no *software* EMTP-ATP®. Porém, além das resistências variáveis já existentes no modelo universal, acrescentou-se uma resistência fixa para que a impedância de uma árvore inclinada sobre um condutor da rede de distribuição fosse representada. Fazendo a comparação dos resultados com outros modelos já publicados, foi possível validar o modelo proposto e inseri-lo ao sistema teste IEEE 13 barras, possibilitando a extração das características de corrente no alimentador.

Finalmente, em Sedighi (2014), sugeriu-se um novo modelo de representação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. Essa representação foi simulada em EMTP-ATP® e baseia-se no modelo de arco proposto por Emanuel et al. (1990), o qual é composto por duas fontes de corrente contínua com tensões V_p e V_n ligadas em anti-paralelo por meio de dois diodos com polaridades invertidas, representado na Figura 2. Esse trabalho consiste em cinco modelos de arco de Emanuel utilizados em paralelo, onde cada arco se conecta ao modelo através de interruptores estatísticos. Todos os dados foram coletados de testes realizados em uma rede real de distribuição de 20 kV, onde um condutor foi conectado a uma fase do alimentador e, para cada teste, foi jogado no chão considerando as seguintes superfícies: asfalto úmido e seco, cimento, solo e árvore seca. Ainda, a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) foi aplicada para extrair as componentes dos sinais obtidos.

Figura 2 – Modelo de Arco de Emanuel.



Fonte: Stein (2015).

1.4.2 Metodologias para a detecção e classificação das FAIs

O sistema proposto por Neto (2005), utiliza os sinais de corrente para identificar faltas de alta impedância, baseando-se, basicamente, na análise dos módulos e ângulos das correntes do alimentador. O conjunto é composto por três sensores, cada um instalado em uma fase do circuito de distribuição, fazendo o monitoramento da defasagem angular entre as correntes trifásicas que circulam pelo alimentador (120° em condições normais) e identificam quando há mudança no ângulo entre as correntes, detectando assim, a interrupção de um dos condutores. Os testes foram realizados em laboratório experimental e os resultados mostraram-se consistentes, porém, ainda requer estudos complementares para redução do tempo de resposta do sistema.

De acordo com Oliveira et al. (2002), as Transformadas Wavelet (TW) contínuas e discretas, desde a sua introdução, mostraram-se como uma poderosa ferramenta na Engenharia. A análise de sinais e sistemas por essa ferramenta tem demonstrado superioridade se comparada à análise de Fourier clássica em diversas ocasiões. Essas análises consistem basicamente na decomposição de um sinal em um conjunto de funções bases, todas elas derivadas de uma única

wavelet protótipo (wavelet-mãe) por diversos escalonamentos (dilatações e compressões) e translações (deslocamentos no tempo).

Baseado nas técnicas de TW, um algoritmo simples e eficaz de detecção do arco elétrico em redes de distribuição foi proposto em Michalik et al. (2006). Esse algoritmo faz a exploração do deslocamento de fase entre coeficientes wavelet da tensão e da corrente de sequência zero. Depois disso, uma Rede Neural Artificial (RNA) escolhe se irá enviar um sinal de abertura do disjuntor da subestação, disparar um alarme ou manter o estado de operação normalmente. Utilizando o software EMTP-ATP®, o detector foi testado, exibindo um melhor desempenho do que algoritmos e métodos tradicionalmente utilizados.

Além disso, em Barros (2009), sugeriu-se a detecção de FAIs através de um cálculo algébrico por meio da observação da diferença entre o valor eficaz médio estimado e o valor eficaz medido por intermédio da oscilografia das correntes trifásicas, extraídas dos sinais de corrente. Se uma anomalia de corrente for detectada, atua a sua classificação baseada na lógica *Fuzzy*. Os dados necessários para a pesquisa de faltas foram obtidos por meio de simulações de um modelo de alimentador radial no software EMTP-ATP®.

Uma derivação da ferramenta TW, é a Transformada Wavelet Discreta (TWD) utilizada por Torres et al. (2011) para fazer a detecção de FAI na rede elétrica através da amplitude da soma de todos os módulos dos coeficientes wavelet. O estudo realizado foi implementado em um sistema de distribuição de energia elétrica com dados de campo e simulado no EMTP-ATP®.

De forma similar, em Vijayachandran e Mathew (2012), também foi utilizada a TWD, porém, propondo um método para a detecção em razão da inclinação de árvores sobre a rede de média tensão. Além disso, foi utilizado o *software* MATLAB/Simulink® e os resultados obtidos foram validados com o auxílio de uma RNA.

Outro algoritmo, proposto por Farias (2013), contribuiu para detecção de FAIs, bem como para a identificação e classificação de transitórios. Para possibilitar tal identificação, utilizou-se a TWD e uma técnica de Phase-Locked Loop (PLL) como ferramentas matemáticas de base. Já para a classificação foi utilizada uma Rede Neural do tipo GRNN (Generalized Regression Neural Network).

Com o auxílio da TW, RNA e FFT, Fanucchi (2014) apresentou um método que executa o monitoramento frequente dos sinais de corrente com o intuito de detectar uma descontinuidade vinculada a uma FAI que possa vir a ocorrer no sistema. Se essa detecção acontecer, é verificado se o evento realmente é uma FAI e, se confirmado, ocorre a localização

dessa falta. Para viabilizar a análise do método proposto e validar seus resultados, um sistema real de distribuição foi modelado em EMTP-ATP® e seus dados reais foram obtidos em campo na ocorrência de um curto-circuito bifásico.

O recente trabalho realizado por Stein (2015) é composto por um estágio de detecção de transitórios e outro de classificação da FAI. A primeira etapa é realizada através de uma técnica que se fundamenta no monitoramento das distâncias euclidianas entre dois pontos consecutivos formados através de amostras do sinal de corrente e suas respectivas funções-diferença. Já a classificação é realizada através do rastreamento da fase de buildup presente nos sinais de corrente. Tal metodologia foi implementada em MATLAB e os sinais oriundos da ocorrência de FAIs foram simulados em EMTP-ATP®, sendo que, em todos os casos analisados, as FAIs foram detectadas e classificadas corretamente.

Por fim, Leite (2017) contribuiu com a identificação e localização de FAIs com ruptura do condutor, usando Medidores Inteligentes. O fator de desequilíbrio calculado no secundário dos transformadores faz a identificação da ruptura do cabo, por meio de uma nova função a ser implementada nos medidores inteligentes, de forma que esse fator tenha um limite para o qual é feita a identificação de tal rompimento. Já a localização, é possibilitada uma vez que é conhecida a posição elétrica de cada medidor e seu respectivo transformador. Tal localização, é feita através da comparação dos fatores de desequilíbrio dos medidores a jusante e a montante do condutor rompido. Os resultados obtidos foram relevantes, com a identificação adequada para as faltas séries simuladas, sendo que as metodologias propostas foram testadas e validadas em MATLAB/Simulink® e Microsoft Excel®.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde, no Capítulo 1, é apresentada uma introdução ao tema proposto, contendo as considerações gerais, a motivação para realização do estudo e os objetivos do Trabalho. Também, é apresentada a revisão bibliográfica relacionada ao tema, contemplando os modelos de representação do arco elétrico, as metodologias de detecção e de classificação das FAIs.

No Capítulo 2, é descrita a fundamentação teórica utilizada como base para o desenvolvimento desse Trabalho. Nesse Capítulo, faz-se uma abordagem sobre os transitórios em sistemas de distribuição e as faltas de alta impedância, além de apresentar os conceitos envolvendo os dispositivos de proteção convencionais utilizados no sistema, algumas técnicas existentes para detecção e classificação de FAIs, assim como uma breve abordagem sobre a lógica Fuzzy.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia proposta para detecção e classificação de FAIs.

O Capítulo 4 apresenta o sistema teste utilizado para simulação dos casos de FAI, juntamente com modelo de arco elétrico implementado, bem como os resultados obtidos pela metodologia proposta, bem como a análise desses resultados.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

A principal responsabilidade dos sistemas elétricos de potência é disponibilizar energia constante ao consumidor final, com tensão e frequência adequadas, mantendo um elevado nível de continuidade do serviço. No entanto, é inevitável a ocorrência de perturbações oriundas de falhas em equipamentos, fatores naturais, acidentes físicos, acréscimos de carga e afins. Neste contexto, vê-se a necessidade de um sistema de proteção confiável e seguro, de forma a reduzir os danos no sistema elétrico, detectando condições anormais e corrigindo-as de forma rápida e eficaz.

As atuações eficientes dos esquemas de proteção baseiam-se: na seletividade do sistema, isolando apenas a parte defeituosa e mantendo as demais em funcionamento; na rapidez em eliminar as faltas, de forma a não interferirem no restante do circuito; na sensibilidade da proteção em relação aos defeitos que possam vir a ocorrer; na segurança, não permitindo a proteção atuar indevidamente; e na economia, de forma que a implementação do sistema de proteção seja economicamente viável (FILOMENA, 2008).

Neste Capítulo, estão contidos alguns tópicos que servem como base para o entendimento do presente trabalho. Assim, a Seção seguinte trata sobre alguns transitórios presentes nos sistemas de distribuição. Em seguida, são descritos com mais detalhes as causas, a classificação e as características das FAIs. Também, há uma Seção onde são introduzidos alguns dos principais equipamentos de proteção utilizados nas redes de distribuição e seus respectivos princípios de funcionamento. Outra Seção trata de alguns métodos de detecção existentes na literatura e, por fim, a última Seção traz uma breve abordagem referente a lógica Fuzzy.

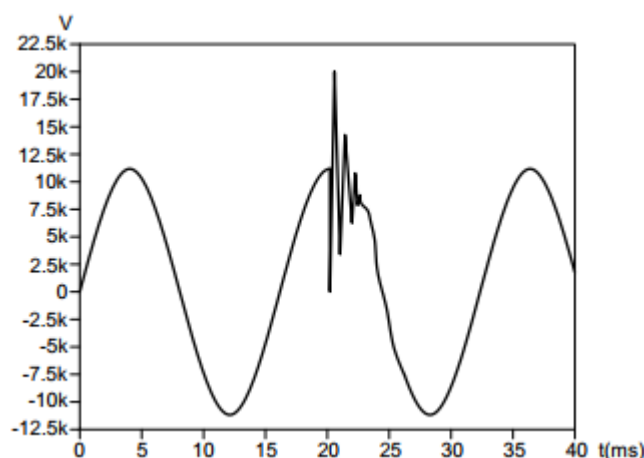
2.2 Transitórios em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Os transitórios são definidos como um fenômeno eletromagnético relacionado à alternância de energia ocorrida quando um sistema elétrico muda o seu estado, provocando demasiadas alterações de tensão e corrente, podendo resultar em danos aos elementos e equipamentos envolvidos. Esses episódios podem acontecer internamente ou externamente ao sistema (FANUCCHI, 2014).

Os transitórios dividem-se em impulsivos e oscilatórios. O primeiro caracteriza-se por ser unidirecional, de curta duração e de origem atmosférica (descargas elétricas), também

conhecido como surtos atmosféricos, os quais afetam a forma de onda das grandezas elétricas e apresentam uma frequência maior que 5 kHz com duração menor que 5 microssegundos. Já o segundo tipo, varia nos dois sentidos, o qual é mostrado na Figura 3. Estes são caracterizados por durarem menos que 30 ciclos, podendo apresentar frequências altas (até 5 kHz), ou, também, frequências baixas (abaixo de 300 Hz). Geralmente, são derivados de eventos comuns do sistema como, por exemplo, o chaveamento de cargas indutivas, energização de linhas, entre outros (GARCIA, 2010).

Figura 3- Sinal de um transitório oscilatório.



Fonte: Stein (2015).

2.3 Falhas de Alta Impedância

As falhas de alta impedância acontecem quando um condutor da rede primária de energia entra em contato com determinada superfície de alta impedância, podendo ou não haver o rompimento do mesmo. Os dispositivos de proteção convencionais presentes nas redes de distribuição atuam por meio da detecção de sobrecorrente conforme seus ajustes pré-estabelecidos. No caso das FAIs, não há a sensibilização desses equipamentos devido ao fato de que esse tipo de falta possui, caracteristicamente, correntes muito próximas ou até mesmo abaixo da corrente nominal de carga dos alimentadores.

De acordo com Leite (2017), as FAIs podem ser classificadas em falhas ativas e falhas passivas. As falhas ativas são caracterizadas pela presença do arco elétrico, podendo ser subdivididas em falhas *séries*, quando o condutor se rompe havendo a interrupção da corrente de carga, entrando em contato com o solo ou com algum objeto, e em falhas *shunt*, quando não há o rompimento do condutor, nem a interrupção da corrente de carga, havendo contato ou

aproximação do condutor carregado em relação a alguma superfície. Já as faltas passivas se caracterizam pela ausência do arco elétrico, onde o condutor é rompido interrompendo a corrente de carga, não entrando em contato com nenhuma superfície, ficando apenas suspenso.

As FAIs ocorrem com mais frequência em sistemas de distribuição de até 15 kV do que em sistemas de transmissão, segundo Júnior (2006), em consequência das características das faltas e das redes de distribuição. Os valores de corrente dessas faltas variam, pois dependem da resistência da superfície com a qual o condutor entra em contato, além de que podem ser afetadas pelas condições climáticas e umidade do solo. A Tabela 1 mostra a variação da corrente de FAI conforme o tipo de superfície de contato.

Tabela 1 - Correntes de FAI para diferentes tipos de superfície.

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

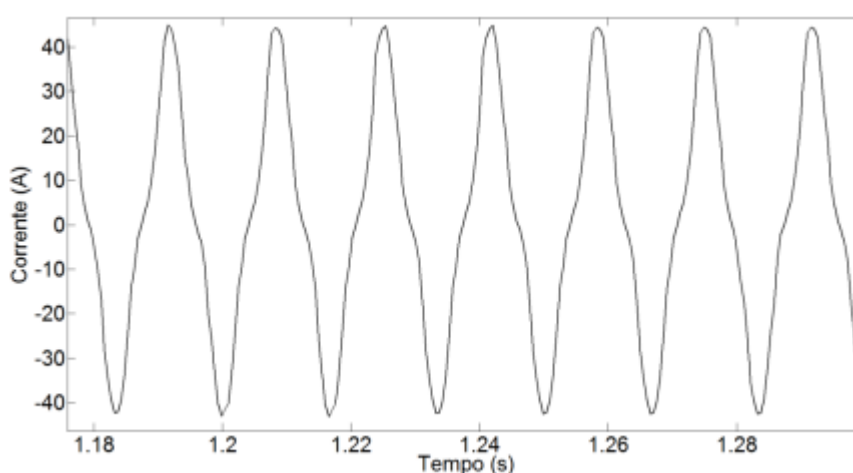
Fonte: Aucoin et al. (1989).

O fato desse tipo de falta ser de difícil detecção a torna um problema de grande preocupação, visto que, quando há o rompimento do condutor, elas representam um sério risco à vida dos seres vivos por poderem causar acidentes e choque elétrico, uma vez que se mantêm energizados. Além disso, podem haver prejuízos financeiros às concessionárias e patrimônios, além de grandes danos ambientais decorrentes de incêndios. Nesse contexto, diversas pesquisas foram realizadas na intenção de explorar e estudar as principais características e comportamentos desses eventos aleatórios e dinâmicos, a fim de auxiliar na sua detecção.

Uma das principais características da FAI é a presença do arco elétrico. Isso acontece devido o contato do condutor com o solo ou superfície não ser fixo, havendo uma pequena camada de ar isolante entre eles. O aumento da diferença de potencial em relação a uma distância tão pequena rompe o dielétrico do ar, conduzindo corrente e produzindo o arco elétrico. Entretanto, antes da condução estável do arco, acontece de forma rápida à ignição e extinção do arco, denominado centelhamento (NAKAGOMI, 2006).

Segundo Farias (2013), o arco elétrico é o grande encarregado de causar a assimetria da corrente de falta retratada em componentes de frequência diferentes da fundamental e está associado a oscilação da resistência elétrica do arco e da superfície durante a FAI. Uma análise do aspecto assimétrico da corrente foi feita no interior de um solo arenoso em um experimento realizado por Emanuel et al. (1990), tendo como resultado a magnitude do semiciclo positivo maior do que a do semiciclo negativo, para pequenas e para grandes amplitudes de corrente. A Figura 4 retrata a assimetria verificada na forma de onda da corrente de FAI.

Figura 4 - Forma de onda da corrente de uma FAI



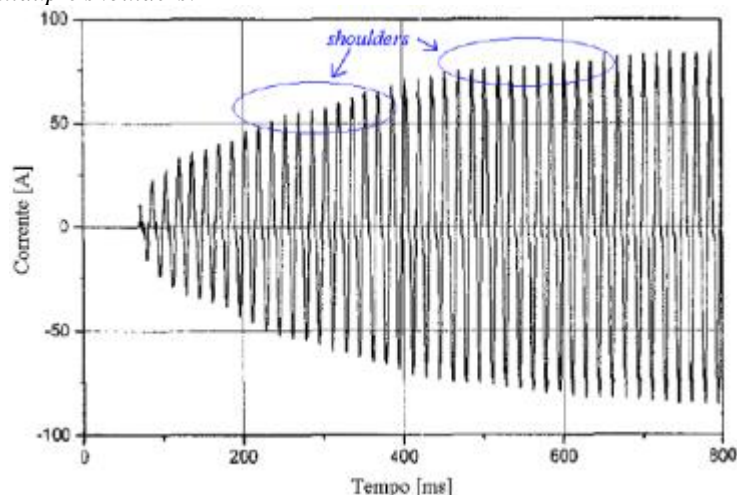
Fonte: Farias (2013).

Além disso, é verificado um vasto conteúdo harmônico nas FAIs decorrentes da distorção e assimetria da corrente, e, também, da sua aleatoriedade de interrupção e variação progressiva a cada semiciclo (NAKAGOMI, 2006). A distorção na forma da onda, resultante da não-linearidade da resistência do arco, é responsável pelas harmônicas de baixa ordem (da 3ª a 10ª harmônica). Já as harmônicas de ordem par fundamental (2ª, 4ª, 6ª, ...) aparecem devido a assimetria entre os semiciclos. Ademais, as harmônicas de alta frequência surgem devido à intermitência aleatória (fiscamento) e a descontinuidade da corrente durante a formação e extinção do arco. Por fim, frequências não múltiplas da fundamental, denominados harmônicos intercalados ou inter-harmônicos, manifestam-se em consequência da variação da amplitude da corrente ao longo do tempo.

Esse crescimento aleatório da amplitude da corrente no decorrer do tempo é outra característica bastante peculiar das FAIs, conhecida como fase de *buildup*, a qual está relacionada com o tempo de acomodação do condutor ao solo ou por causa do caminho de ionização que se distribui progressivamente devido aos pequenos arcos que surgem. Durante

esta etapa, existem alguns trechos em que a amplitude se mantém constante durante alguns ciclos antes de retomar seu crescimento. Esse fenômeno é denominado como *shoulders*. Esses dois eventos podem ser visualizados na Figura 5.

Figura 5 - Fase de *buildup* e *shoulders*.



Fonte: Nakagomi (2006).

2.4 Dispositivos de Proteção em Redes Aéreas de Distribuição

Nesta seção, serão introduzidos os principais equipamentos de proteção utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Dentre eles, destacam-se: Elos fusíveis, Religadores Automáticos, Seccionalizadores Automáticos, Disjuntores e Relés.

2.4.1 Elos Fusíveis

São dispositivos muito utilizados em sistemas de distribuição. Trabalham juntamente com as chaves fusíveis que, caso venham a se romper, abrem seus contatos possibilitando sua substituição e o reestabelecimento do circuito. Sua atuação ocorre quando uma corrente superior à suportada circula através do elemento fusível, fundindo-o e interrompendo a passagem de corrente no circuito.

O tempo que o elo leva até ser interrompido depende, principalmente, da intensidade da corrente circulante no fusível e do tipo do material do elemento fusível. Já a capacidade máxima de interrupção está relacionada com a capacidade do cartucho em relação aos gases e a pressão interna, e, também, da força decorrente da expulsão dos gases e da capacidade térmica dos contatos. Os elos fusíveis podem ser instalados do lado da fonte (elo-fusível protegido) ou instalados do lado da carga (elo-fusível protetor) (BARROS, 2009).

2.4.2 Religadores Automáticos

São equipamentos amplamente utilizados pelas concessionárias, devido a sua capacidade de diferenciar faltas permanentes de faltas transitórias. Esses dispositivos operam quando uma corrente de curto-circuito é detectada, abrindo e fechando seus contatos por um número preestabelecido de vezes.

Quando há a detecção de uma sobrecorrente, os contatos se abrem e permanecem abertos até a contagem do tempo de religamento, depois disso os contatos se fecham e o sistema é reestabelecido. Caso ainda houver a presença da sobrecorrente, essa mesma sequência de atuações se repete durante três vezes e, após a quarta abertura os contatos se mantêm abertos e travados, sendo possível reenergizar a linha apenas de forma manual (STEIN, 2015).

2.4.3 Seccionador Automático

Consiste em um equipamento usado para fazer a interrupção automática de um circuito, abrindo seus contatos quando o circuito é desenergizado certo número de vezes por um dispositivo de proteção à sua retaguarda.

O seccionador é composto de um sensor de sobrecorrente e um mecanismo que faz a contagem dos desligamentos ocorridos no equipamento de retaguarda, além de contatos e dispositivos para travamento. Quando o seccionador identifica uma sobrecorrente cujo valor seja maior ou igual a corrente de acionamento, o equipamento é armado e preparado para a contagem. Essa contagem tem início quando a corrente circulante por ele é interrompida pelo equipamento de retaguarda ou fica abaixo de determinado valor. Conforme o ajuste, após determinadas ocorrências de desligamento, os contatos se abrem, travando e isolando o trecho com falha (ELETROBRÁS, 1982).

2.4.4 Disjuntores Associados com Relés

O disjuntor destina-se a fechar ou interromper um circuito de corrente alternada frente às condições de normalidade, anormalidade ou emergenciais. Já o relé, é o dispositivo designado a atuar quando as correntes desses circuitos ultrapassam um valor pré-definido. Eles possuem características de tempo definido ou tempo inverso.

A relação entre esses dois equipamentos é que os disjuntores são comandados pelos relés. Esses relés, ao detectarem uma perturbação que venha a prejudicar os equipamentos ou o bom funcionamento do sistema, enviam um sinal elétrico que comanda a abertura de um ou mais disjuntores, de forma a isolar parte do sistema ou equipamento comprometido pela falha, impedindo que haja danos aos equipamentos, ou que esta afete a operação, ou alcance outros componentes sem defeitos (ELETROBRÁS, 1982).

2.5 Métodos Existentes para a detecção de FAIs

Como visto anteriormente, nas últimas décadas, muitas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de propor técnicas de detecção de FAIs, a fim de solucionar ou minimizar os problemas causados por elas. Para isso, são utilizadas técnicas baseadas em algoritmos no domínio do tempo ou no domínio da frequência (utilizando medições existentes), métodos de detecção mecânicos e através de sensores.

As técnicas fundamentadas em medições existentes possuem um baixo custo de implementação, pois utilizam informações de corrente e/ou tensão já presentes no sistema, obtidas através de relés nas subestações ou religadores distribuídos nos alimentadores. Esses métodos utilizam algoritmos no domínio do tempo ou frequência, sendo o primeiro mais simples de ser implementado e entendido, porém, apresentando uma maior limitação para a detecção de FAIs, se comparado ao segundo tipo (FARIAS, 2013).

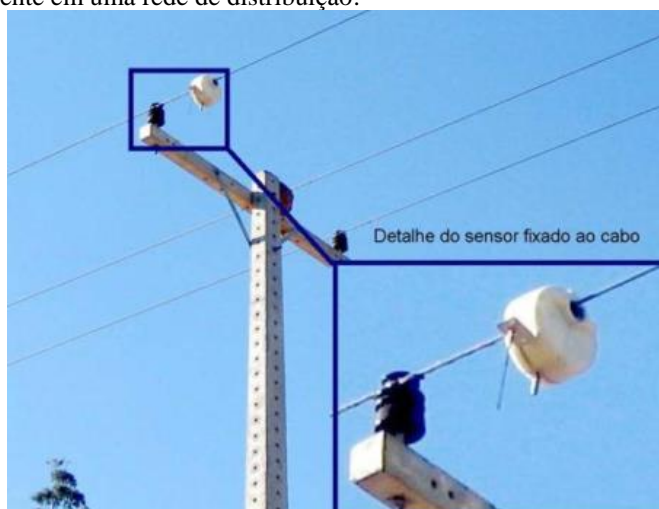
No domínio da frequência, vários trabalhos utilizam a Transformada de Fourier devido ao conteúdo harmônico encontrado nas faltas de alta impedância, agregadas ao uso de Redes Neurais. Todavia, a maioria dos pesquisadores faz o uso da Transformada Wavelet, devido a sua capacidade de trabalhar tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência, além de tratar de sinais não estacionários, onde o sinal apresenta diferentes componentes de frequência durante a sua duração, que é o caso da FAI (FARIAS, 2013).

Outra maneira de se detectar a FAI, é fazendo a utilização de métodos mecânicos. Geralmente, essas técnicas consistem em forçar o contato entre o condutor rompido e um aterramento sólido para induzir a atuação dos equipamentos convencionais de sobrecorrente. Um exemplo desse método é citado em Vico et al. (2010), em que um dispositivo mecânico é instalado no poste ou cruzeta abaixo de cada condutor, para que, quando houver o rompimento do condutor, uma mola seja liberada a partir da força exercida pelo cabo, expelindo um barramento que faça contato com o condutor em queda, criando uma baixa impedância de falta e, conseqüentemente, uma elevada corrente de curto-circuito, possibilitando a sensibilização dos dispositivos convencionais de sobrecorrente.

Por fim, a detecção pode ser efetuada fazendo o uso de sensores de tensão ou de corrente, distribuídos nos alimentadores. O primeiro detecta quando a tensão em uma das fases cai abaixo de um valor pré-estabelecido (condutor rompido), enviando um sinal através do neutro até um dispositivo de manobra (chave telecomandada) a montante do sensor, abrindo seus contatos. A desvantagem desse sistema se dá devido à necessidade de se ter um condutor neutro para o envio do sinal e também, pela possibilidade de desenergizações desnecessárias caso um fusível

entre o sensor e a chave opere, diminuindo a tensão do sensor fazendo com que ele atue. Já o sensor de corrente faz o monitoramento da corrente elétrica em cada fase do circuito, detectando a ocorrência de uma FAI, caso haja alteração da defasagem angular entre as correntes (FARIAS, 2013). Em Neto (2005), foi proposta a implantação de sensores de corrente com comunicação via rádio, o qual é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Sensor de corrente em uma rede de distribuição.



Fonte: Neto (2005).

Outro sensor utilizado por Neto (2005) é o extensômetro. Esses sensores baseiam-se na variação da resistência elétrica dos materiais de acordo com a deformação física que esses experimentam, convertendo o efeito mecânico em um sinal elétrico. No caso das FAIs, o rompimento do condutor causa a alteração da tração mecânica dos isoladores que o sustentam. Esses sensores podem ser instalados em isoladores de pinos ou de ancoragem, sendo que, no primeiro, é necessário a instalação de extensômetros mais sensíveis, já que estes realizam uma tração muito menor que a dos isoladores de ancoragem.

2.6 Lógica Fuzzy ou Nebulosa

O conceito de lógica fuzzy foi consolidado por Lofti A. Zadeh em 1965, com a finalidade de manipular informações incertas e representa-las em valores numéricos. A principal característica da lógica nebulosa é sua capacidade de tomar decisões corretas baseadas no raciocínio humano, a partir de dados imprecisos e vagos (BARROS, 2009).

Um conjunto nebuloso A , definido no universo de discurso U , pode ser expresso por:

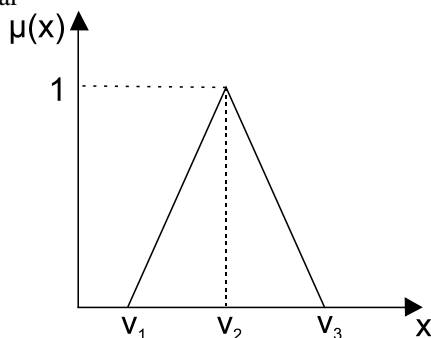
$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (2)$$

Sendo que, em (2), $\mu_A(x)$ representa o valor da função de pertinência do conjunto nebuloso A , correspondente ao elemento x pertencente a U . A função de pertinência relaciona um número real $\mu_A(x)$ no intervalo $[0,1]$ a cada componente x pertencente a U . Logo, a função $\mu_A(x)$ representa o grau de pertinência entre x e o conceito expresso por A (BARROS, 2009):

- Se $\mu_A(x) = 1$, então x é totalmente compatível com A ;
- Se $0 < \mu_A(x) < 1$, então x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$;
- Se $\mu_A(x) = 0$, então x é totalmente incompatível com A ;

As funções de pertinência podem aderir a diferentes formas (triangulares, gaussianas, trapezoidais e exponenciais) que estão relacionadas com a entrada e a resposta de saída. A Figura 7 representa uma função triangular definida pelos vértices v_1 , v_2 e v_3 , os quais determinam o desempenho da inferência fuzzy (DECANINI, 2008).

Figura 7- Função de pertinência triangular



Fonte: Decanini (2008).

Um sistema fuzzy condiciona-se através de um conjunto de regras da seguinte forma:

- Se, x é $A \rightarrow$ premissa;
- Então, y é $B \rightarrow$ conclusão/consequência;

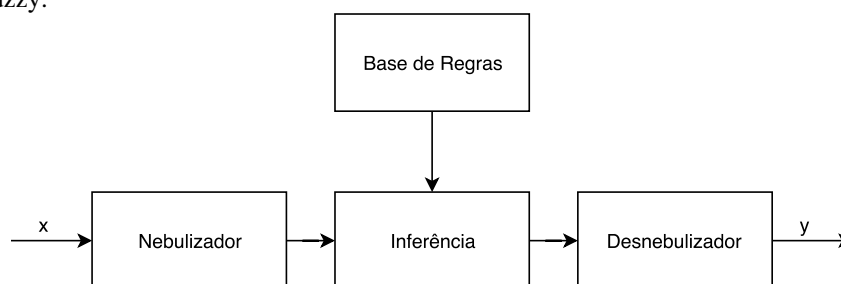
Sendo:

x e y : variáveis de entrada e saída, respectivamente;

A e B : termos linguísticos associados aos conjuntos fuzzy;

Um sistema fuzzy básico está representado na Figura 8, composto por um módulo *Nebulizador* e outro *Desnebulizador*, onde números reais são convertidos em termos linguísticos e termos linguísticos são transformados em números reais, respectivamente, permitindo que o usuário trabalhe com variáveis de entrada de valor real e obtenha variáveis de saída de valor real. Além disso, são constituídos também de um módulo *Base de Regras*, onde o banco de regras é armazenado, e um de *Inferência*, o qual manipula a base de regras (DECANINI, 2008).

Figura 8- Sistema Fuzzy.



Fonte: Decanini (2008).

Estes sistemas são comumente empregados na automação de processos que se baseiam no fornecimento de dados imprecisos para a solução de problemas, os quais podem ser resolvidos a partir de um conjunto de regras de senso comum, através de um método de inferência simples e rápido, estabelecido pelos sistemas nebulosos.

2.7 Considerações Finais

De acordo com os temas apresentados neste Capítulo, foram descritas as causas e a classificação das faltas de alta impedância, juntamente com as consequências que estas trazem às pessoas e aos sistemas de energia. Também, foram apresentadas as principais características das FAIs, como a fase de *buildup* e a presença do arco elétrico, o qual causa as distorções e assimetrias de corrente, bem como discutiu-se o comportamento aleatório observado nesse tipo de evento, o qual é de difícil detecção através dos dispositivos convencionais de proteção. Este Capítulo aborda também sobre o amplo conteúdo harmônico presente nesse tipo de falta, juntamente com as técnicas utilizadas para sua detecção, enfatizando a eficácia dos métodos que utilizam a Transformada Wavelet. Por fim, foi feita uma breve abordagem sobre os fundamentos básicos da lógica fuzzy, uma ferramenta de extrema importância utilizada para solução de sistemas incertos e imprecisos, a qual apresenta resultados de grande exatidão. O

Capítulo seguinte apresenta a metodologia proposta neste Trabalho para detecção e classificação das FAI.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Considerações Gerais

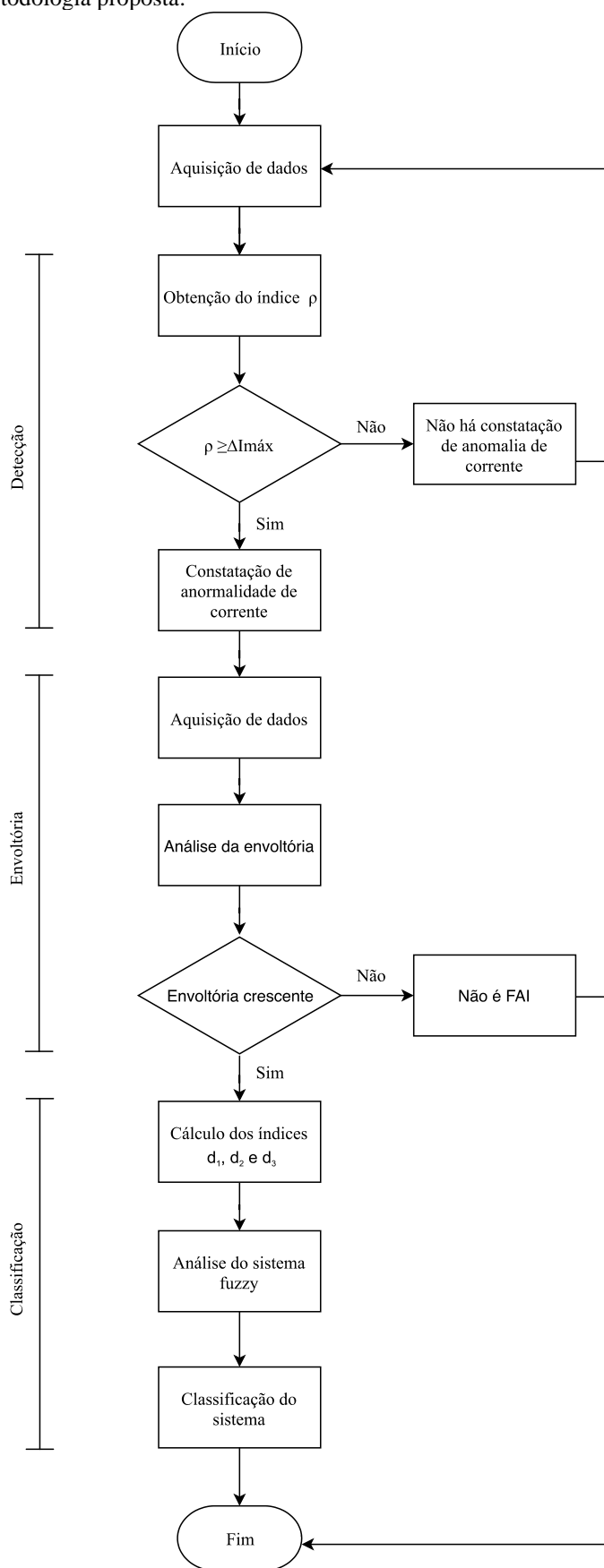
Neste Capítulo, é apresentada a metodologia proposta para detecção e classificação de FAIs em redes de distribuição de energia elétrica, a qual foi inspirada na proposta apresentada em Barros (2009). Trata-se de um aperfeiçoamento da técnica já existente, a fim de aperfeiçoar o método e auxiliar no estudo da eficiência dos sistemas de proteção e no desenvolvimento de dispositivos que atuem de forma rápida e precisa.

A técnica desenvolvida fundamenta-se em monitorar os elementos do sistema, seja um alimentador, transformador ou um ramal, com o intuito de identificar a presença de anormalidades no mesmo e classificá-las através da lógica Fuzzy. Para que essa identificação seja efetuada, são realizados alguns cálculos algébricos baseados nas informações das oscilografias das correntes trifásicas extraídas da subestação de energia elétrica, obtendo-se o índice ρ através da diferença absoluta entre a amplitude estimada das correntes trifásicas (amplitude de referência) e a amplitude medida das correntes trifásicas. Se constada a anomalia de corrente, caracterizada pelo índice ρ , um sistema de inferência fuzzy é executado permitindo a classificação da falta, por meio da extração das características dos índices d_1 , d_2 e d_3 .

Além disso, um algoritmo que analisa a envoltória do sinal de corrente foi desenvolvido a fim de distinguir um sinal com características de uma possível FAI, de eventos do sistema como curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico. Se a envoltória apresentar característica crescente, o sinal pode ser um caso de FAI e então a etapa de classificação é executada. Do contrário, caso a envoltória do sinal seja decrescente, já se sabe inicialmente que o evento em questão não é um caso de FAI e sim outro evento. O fluxograma apresentado na Figura 9, ilustra o processo de desenvolvimento da metodologia proposta.

Para a classificação de defeitos assimétricos, que é o caso da falta de alta impedância, os índices d_1 , d_2 e d_3 são suficientes. Na proposta de Barros (2009), além desses índices, faz-se o uso do índice d_4 , destinado a caracterizar faltas simétricas, que não será levado em consideração neste trabalho, pois o mesmo tem por objetivo apenas a classificação de faltas de alta impedância.

Figura 9- Fluxograma da metodologia proposta.

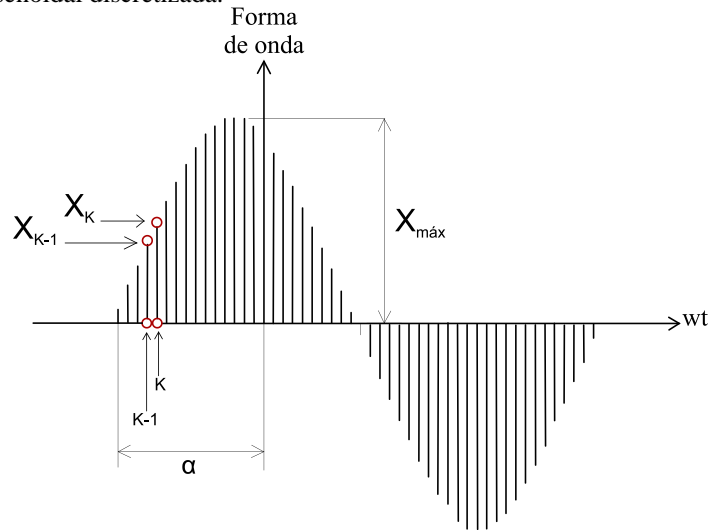


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.2 Identificação da Anomalia

Para que a detecção da anomalia aconteça, é feita a análise oscilográfica da corrente nas três fases de um determinado ponto da rede elétrica, durante um período de tempo suficiente para que a falta seja caracterizada. Através do processo de amostragem, é possível definir, de maneira aproximada, a amplitude da corrente da forma de onda (Figura 10), conforme a Equação 3 (BARROS, 2009).

Figura 10- Forma de onda senoidal discretizada.



Fonte: Adaptado, Barros (2009).

$$X_{máx} = \left| \frac{x_{k-1}}{\text{sen}[\text{tg}^{-1}(\phi)]} \right|; \quad (3)$$

Sendo:

$$\phi = \left| \frac{x_{k-1} \text{sen}(w\Delta t)}{x_k - x_{k-1} \text{cos}(w\Delta t)} \right|;$$

$$\Delta t = t_k - t_{k-1}$$

$$w \equiv \text{velocidade da onda} = 2\pi f;$$

$f = \text{frequência nominal do sistema};$

$k = \text{tempo discreto};$

$\alpha = \text{defasamento angular da forma de onda};$

Os valores de $X_{máx}^i$ são encontrados através da equação (3), com $i=1,2,3,\dots,N$. Assim, tem-se as Equações 4 a 6:

$$X_{méd} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{máx}^i}{\sqrt{2} N}; \quad (4)$$

$$r = |X_{referêncial} - X_{méd}|; \quad (5)$$

$$\rho = \frac{r^a + r^b + r^c}{3}; \quad (6)$$

Onde:

$X_{méd}$: média aritmética dos valores de $X_{máx}$ (eficazes da forma de onda);

$X_{referêncial}$: valor eficaz de referência calculado para as fases a, b e c usando as equações $máx\{abs(Ia)\}$, $máx\{abs(Ib)\}$, e $máx\{abs(Ic)\}$.

r^a, r^b e r^c : índices calculados usando a equação (5), para as fases a, b e c, respectivamente;

ρ : índice de anormalidade da forma de onda em relação ao equipamento monitorado;

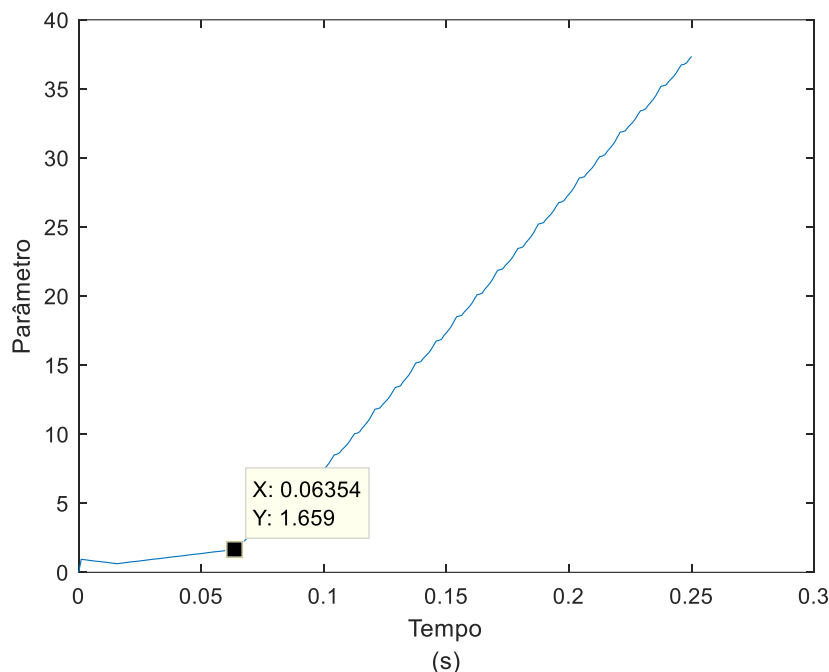
Uma vez obtido o valor da amplitude da corrente ($X_{máx}$), é feita uma relação com o valor de amplitude de referência ($X_{referêncial}$). Se a forma de onda for perfeitamente senoidal, o valor da amplitude será exato. No entanto, se o sinal apresentar alguma variação brusca ou distorção, haverá uma divergência em relação a $X_{referêncial}$. Desta maneira, adaptando as equações (4) à (6), a detecção da falta é proposta mediante o seguinte critério:

se $\rho \geq \Delta I_{máx} \rightarrow d_5=1$ (Indica que há anormalidade de corrente)

se $\rho < \Delta I_{máx} \rightarrow d_5=0$ (Indica que não há constatação de anomalia considerável de corrente)

Sendo $\Delta I_{máx}$ um parâmetro a ser especificado em função da experiência. Neste caso, a FAI começa a ser caracterizada no instante de tempo de 0,06354 segundos, conforme mostra a Figura 11. Isso significa que o parâmetro em questão deve ser ajustado para um valor maior que 1,659. Sendo assim, adotou-se $\Delta I_{máx} = 1,7$.

Figura 11- Especificação do parâmetro $\Delta I_{m\acute{a}x}$.



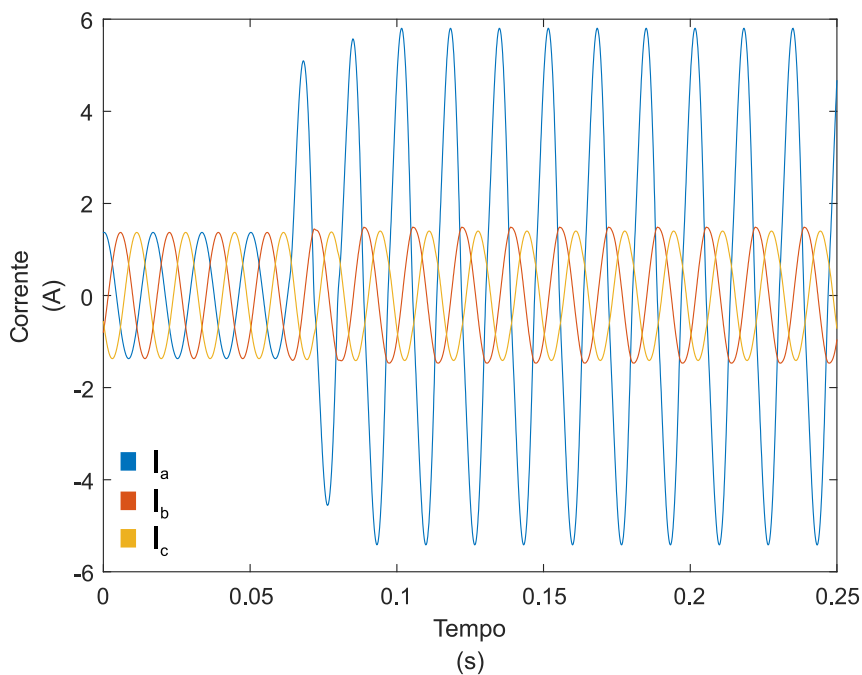
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.3 Análise da Envoltória

Uma das características da FAI, já mencionada nesse Trabalho, é a sua fase de *buildup*, onde o sinal de corrente apresenta um crescimento aleatório de sua amplitude no decorrer do tempo. Sabe-se também que a amplitude de um sinal de corrente para um curto-circuito, seja ele monofásico, bifásico ou trifásico, apresenta inicialmente uma grande elevação no seu valor, comportando-se de forma decrescente ao longo do tempo.

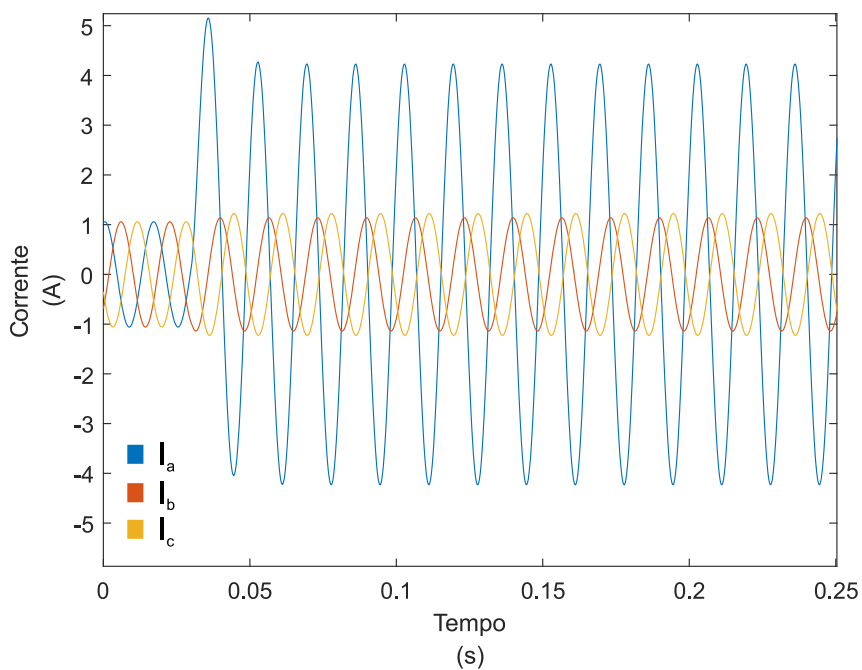
Com base nisso, elaborou-se um algoritmo que avalia se a envoltória do sinal de corrente apresenta característica crescente, representando uma possível situação de FAI, ou se ela é decrescente, caracterizando um curto-circuito ou outro evento, eliminando a possibilidade de ser um caso de FAI. As Figura 12 e Figura 13 mostram o comportamento da envoltória de um sinal de corrente para uma FAI (crescente) e para um curto-circuito (decrescente), respectivamente.

Figura 12- Envoltória de um sinal de corrente em FAI na fase A.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 13- Envoltória de um sinal de corrente em curto-circuito monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

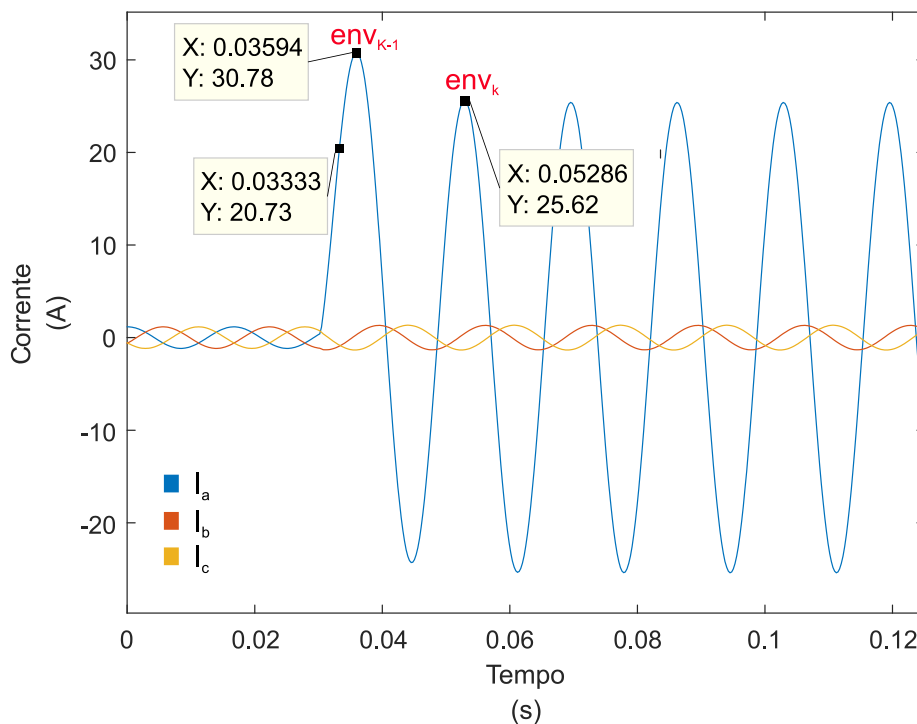
Após detectada a presença de uma anomalia no sinal, o algoritmo desenvolvido cria uma janela com um comprimento equivalente ao dobro do número de amostras por ciclo, e espera

$1,5 * N$ amostras (sendo N o número de amostras/ciclo) para realizar o cálculo do valor máximo da corrente em cada ciclo, conforme (7) e, posteriormente, fazer a subtração desses valores máximos, conforme (8). Ambos os procedimentos são realizados para as três fases do sinal de corrente. Nas Figura 14 e Figura 15 estão representados os valores máximos de cada ciclo (env_{k-1} e env_k) para um caso de curto-circuito e para um caso de FAI, respectivamente. Também, é mostrado o instante em que o algoritmo começa a analisar o primeiro ciclo do sinal, sendo este igual a 0,03333 segundo para o caso de curto-circuito e 0,06614 segundos para o caso de FAI.

$$env = \max(I) \quad (7)$$

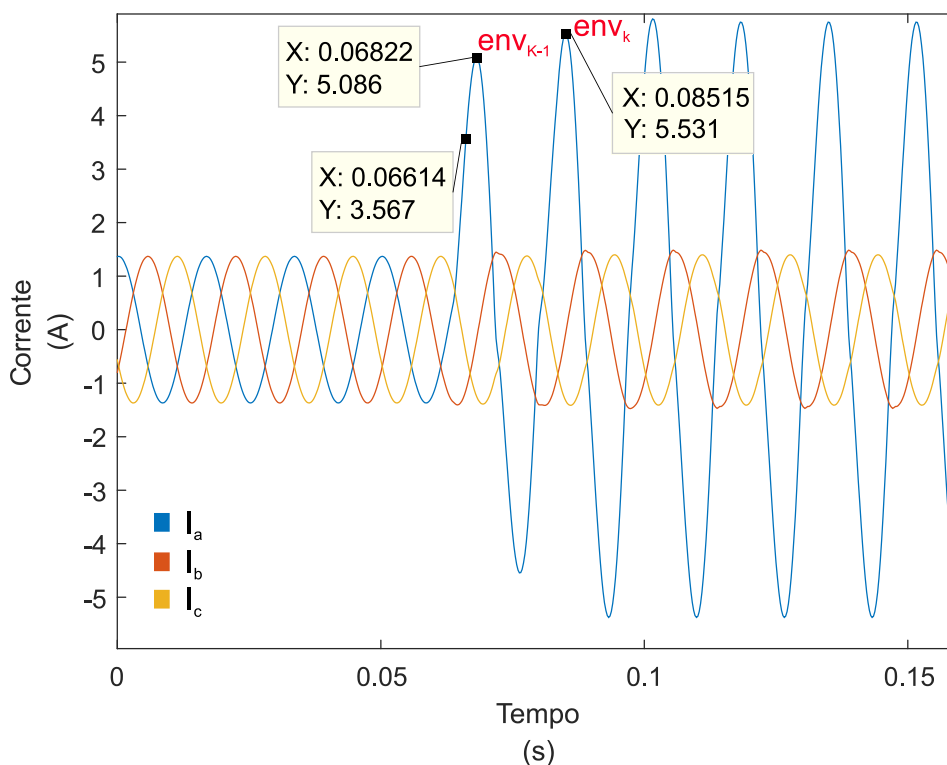
$$Sinal = env_k - env_{k-1} \quad (8)$$

Figura 14 – Valores máximos de corrente para um sinal de corrente de curto-circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 15 – Valores máximos de corrente para um sinal de corrente em FAI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Com base nos resultados obtidos a partir das Equações 7 e 8, para um caso de curto-circuito, teremos como resultado um valor negativo na Equação 8, indicando uma envoltória decrescente. Já para o caso de FAI, (8) retorna um valor positivo, indicando envoltória crescente. Desta maneira, o seguinte critério deve ser atendido para pelo menos uma das fases (A, B ou C) do sinal de corrente em análise. Assim:

- Se $Sinal < 0$

Então, Negativo = 1 e Positivo = 0

Logo, a envoltória do sinal é decrescente, indicando um caso de curto-circuito.

- Se $Sinal > 0$

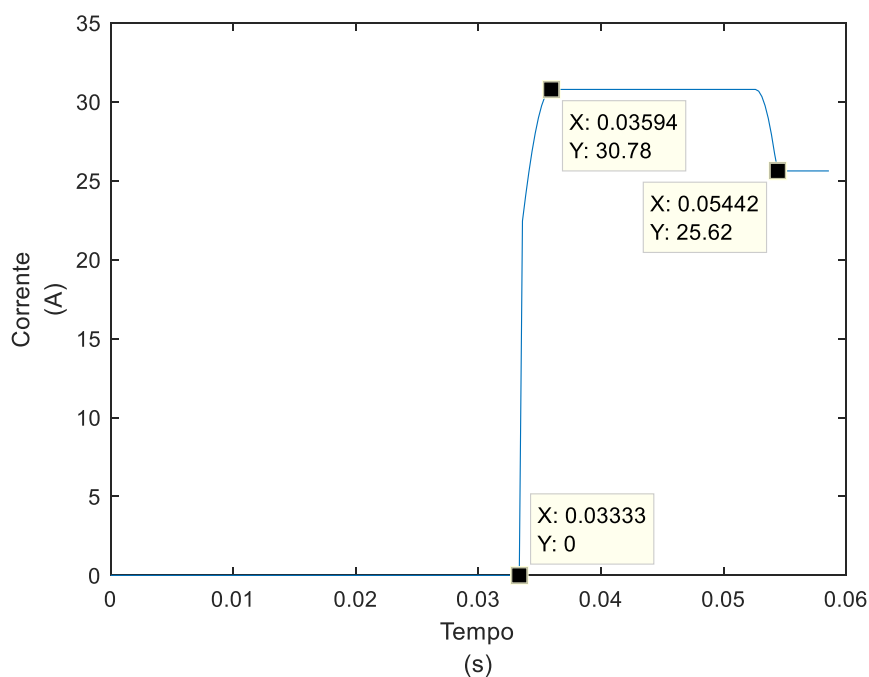
Então, Positivo = 1 e Negativo = 0

Logo, a envoltória do sinal é crescente e inicia-se o processo de classificação para verificar se o sinal é um caso de FAI.

A Figura 16 mostra o comportamento de um caso de curto-circuito, apresentando o instante de tempo em que o método inicia a análise da envoltória em 0,03333 s, até o instante em que ela detecta o valor máximo do primeiro ciclo em 0,03594 s e, também, o instante em que esta decresce (0,05442 segundos), quando é detectado o valor máximo daquele ciclo. Pode-

se observar que tanto os instantes de tempo quanto os valores de corrente equivalem aos valores representados na Figura 14.

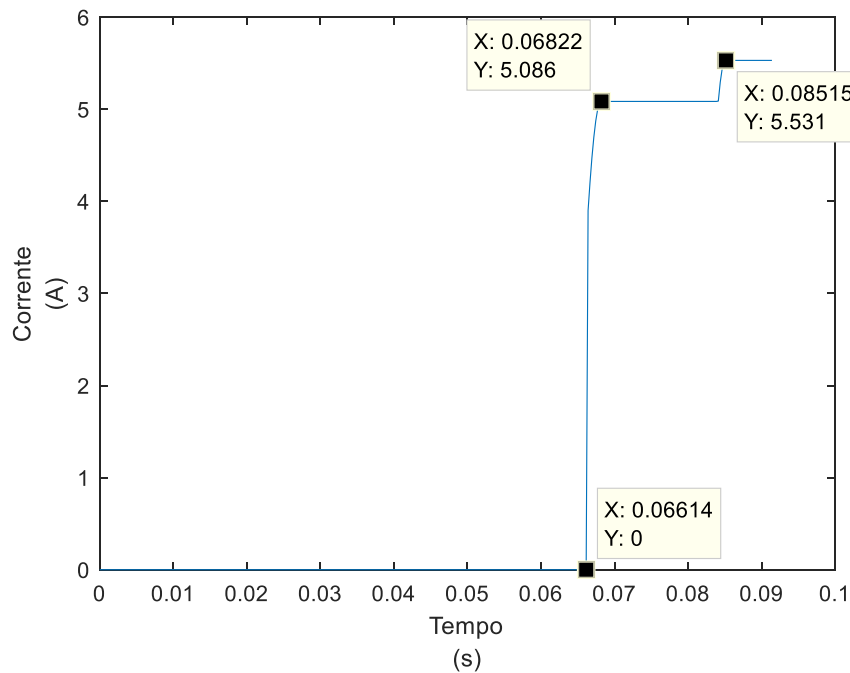
Figura 16 – Comportamento do método da envoltória para um caso de curto-circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A mesma análise comportamental pode ser feita para o caso de FAI representado na Figura 17, onde o método inicia a sua análise em 0,06614 s, detecta o valor máximo do primeiro ciclo em 0,06822 s, e do ciclo seguinte no instante de tempo de 0,08515 s, indicando uma envoltória crescente. Esses valores também conferem com os valores apresentados na Figura 15.

Figura 17 - Comportamento do método da envoltória para um caso de FAI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.4 Classificação de FAIs

Primeiramente, calculam-se as grandezas definidas pelas Equações 9 a 11, a partir dos valores máximos de corrente denotados em cada uma das três fases (BARROS, 2009).

$$da = \frac{\text{máx}\{abs(Ia)\}}{\text{máx}\{abs(Ib)\}} \quad (9)$$

$$db = \frac{\text{máx}\{abs(Ib)\}}{\text{máx}\{abs(Ic)\}} \quad (10)$$

$$dc = \frac{\text{máx}\{abs(Ic)\}}{\text{máx}\{abs(Ia)\}} \quad (11)$$

Onde:

$\text{máx}\{abs(Ia)\}$: valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase a;

$\text{máx}\{abs(Ib)\}$: valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase b;

$\text{máx}\{abs(Ic)\}$: valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase c;

A normalização das grandezas obtidas anteriormente é feita para se obter os valores relativos da corrente entre as três fases, conforme as Equações 12 a 14 (BARROS, 2009).

$$na = \frac{da}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (12)$$

$$nb = \frac{db}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (13)$$

$$nc = \frac{dc}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (14)$$

Por fim, representando as grandezas na forma relativa, tem-se as Equações 15 a 17:

$$d_1 = na - nb \quad (15)$$

$$d_2 = nb - nc \quad (16)$$

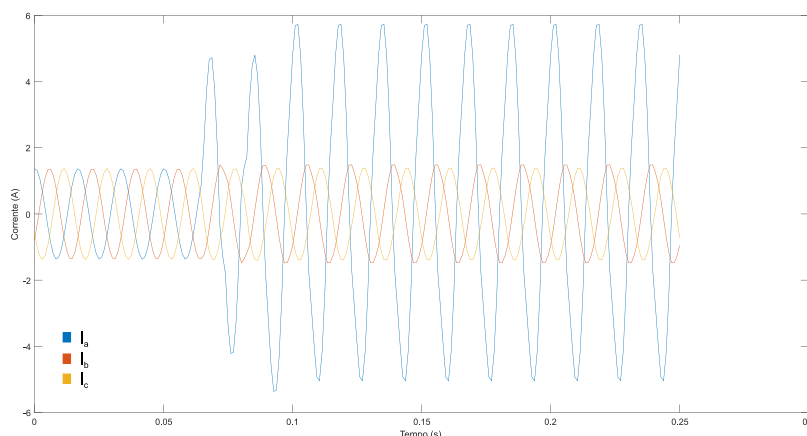
$$d_3 = nc - na \quad (17)$$

A análise de tais índices é feita considerando as magnitudes de um sinal de corrente trifásico, conforme exemplificado na Figura 18, a qual apresenta uma falta de alta impedância na fase A.

Aplicando as Equações 9 à 11, observa-se que da possui valor grande, db será aproximadamente 1 e dc tem valor pequeno. Desta forma, tem-se, das Equações 12 à 14, na igual a 1, nb pequeno e nc muito pequeno. Por conseguinte, aplicando as Equações 15 à 17, d_1 será um valor positivo e grande, d_2 , positivo e pequeno e d_3 , negativo e grande.

Dessa maneira, as características de diferentes casos de curto-circuito podem ser determinadas a partir dos índices d_1 , d_2 e d_3 , valores esses que variam entre -1 e 1, dependendo dos parâmetros do circuito. Com o auxílio da lógica fuzzy, apenas é realizada a classificação de faltas de alta impedância.

Figura 18 – Oscilografia de corrente trifásica com FAI na fase A.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para isso, utilizaram-se os conceitos de máxima pertinência e o conjunto nebuloso do tipo triangular definidos em Barros (2009). Os valores dos vértices desses conjuntos podem ser vistos na Tabela 2, onde NG significa Negativo Grande, NP, Negativo Pequeno, ZE, Zero, PP, Positivo Pequeno e PG, Positivo Grande.

Tabela 2 – Valores dos vértices do conjunto nebuloso

	NG	NP	ZE	PP	PG
Vértice 1	-1	-0,6	-0,0923	0	0,3559
Vértice 2	-0,7615	-0,3	0	0,3	0,7615
Vértice 3	-0,5234	0	0,0923	0,6	1

Fonte: Adaptado, Barros (2009).

Com base nesses valores, os seguintes conjuntos de regras foram estabelecidos:

- Se $d_1=PG$ e $d_2=PP$ e $d_3=NG$ então: FAI na fase A
- Se $d_1=NG$ e $d_2=PG$ e $d_3=PP$ então: FAI na fase B
- Se $d_1=PP$ e $d_2=NG$ e $d_3=PG$ então: FAI na fase C
- Se $d_1=ZE$ e $d_2=ZE$ e $d_3=ZE$ então: Sistema em operação normal.

3.5 Considerações Finais

A técnica para detecção e classificação de FAIs apresentada neste Capítulo baseia-se nas informações de corrente elétrica nas três fases de um determinado ponto do sistema de distribuição de energia elétrica, o que possibilita a redução de custos. Essas correntes

constituem os dados de entrada e tem suas grandezas normalizadas e expressas da forma relativa entre as fases. Sua saída apresenta o diagnóstico do sistema. Para que isso seja possível, estabeleceu-se um critério de inferência com regras pré-estabelecidas, baseado na extração das características das faltas de alta impedância. O Capítulo seguinte apresenta o sistema teste e os resultados obtidos a partir da aplicação da técnica aqui proposta.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

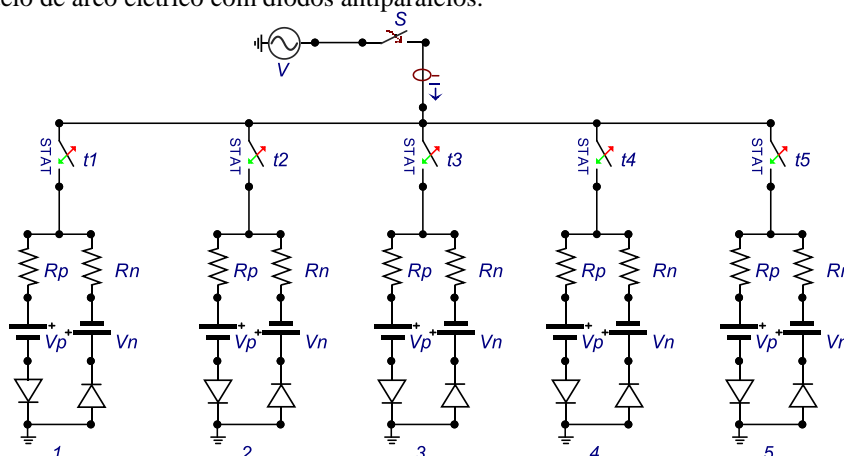
4.1 Considerações Gerais

O método de detecção e classificação, conforme apresentado no Capítulo anterior, conta com o uso de dados oscilográficos extraídos dos sinais de corrente na saída do alimentador da subestação de distribuição de energia elétrica. Diante disso, o presente Capítulo descreve o sistema teste utilizado para possibilitar este estudo. Além disso, um modelo computacional baseado no trabalho de Sedighi (2014), capaz de representar as características típicas das FAIs, foi utilizado para simulação das mesmas e foi integrado ao sistema teste. Para a realização das simulações fez-se o uso da ferramenta computacional EMTP-ATP[®], um *software* amplamente utilizado para simulação de sistemas elétricos de potência e fenômenos eletromagnéticos transitórios. Para implementar os algoritmos e tratar os sinais gerados pelo ATP, foi utilizado o programa MATLAB[®].

4.1.1 Modelo Computacional

Diante de tantas particularidades envolvendo as FAIs, busca-se que as simulações envolvendo esse tipo de fenômeno sejam o mais próximo possível da realidade. À vista disso, ao invés de simular a FAI apenas com um resistor de alta resistência conforme abordado em Barros (2009), fez-se uso de um modelo computacional de arco elétrico capaz de representar as características típicas desse tipo de falta. Esse modelo foi proposto no trabalho apresentado por Sedighi (2014), o qual consiste basicamente em cinco modelos de arco de Emanuel utilizados em paralelo, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Modelo de arco elétrico com diodos antiparalelos.



Fonte: Adaptado, Sedighi (2014).

São introduzidos cinco estados para a corrente de FAI com amplitudes variando entre 9 e 90 A para diferentes tipos de solo. Em cada estado, cinco modelos de arco são utilizados, conectados ao modelo através de interruptores estatísticos com função gaussiana distribuída, usados para acesso ao estado aleatório da corrente de FAI. As combinações desses cinco modelos de arco produzem a corrente de FAI, e todos os seus parâmetros são baseados nos dados de corrente e tensão gravados nos testes em campo (SEDIGHI, 2014), os quais encontram-se descritos na Tabela 3.

Os sinais de corrente gerados por este modelo para os cinco estados podem ser visualizados na Figura 20. Como pode ser observado na simulação das correntes de FAI, as correntes produzidas nos cinco estados apresentam comportamentos semelhantes. É possível perceber a assimetria nos sinais de corrente, ou seja, a magnitude do semiciclo positivo é diferente daquela apresentada no semiciclo negativo, um comportamento típico dessas faltas. Essa assimetria acontece devido à presença do arco elétrico e está relacionada à variação na resistência elétrica do arco e das superfícies durante a FAI.

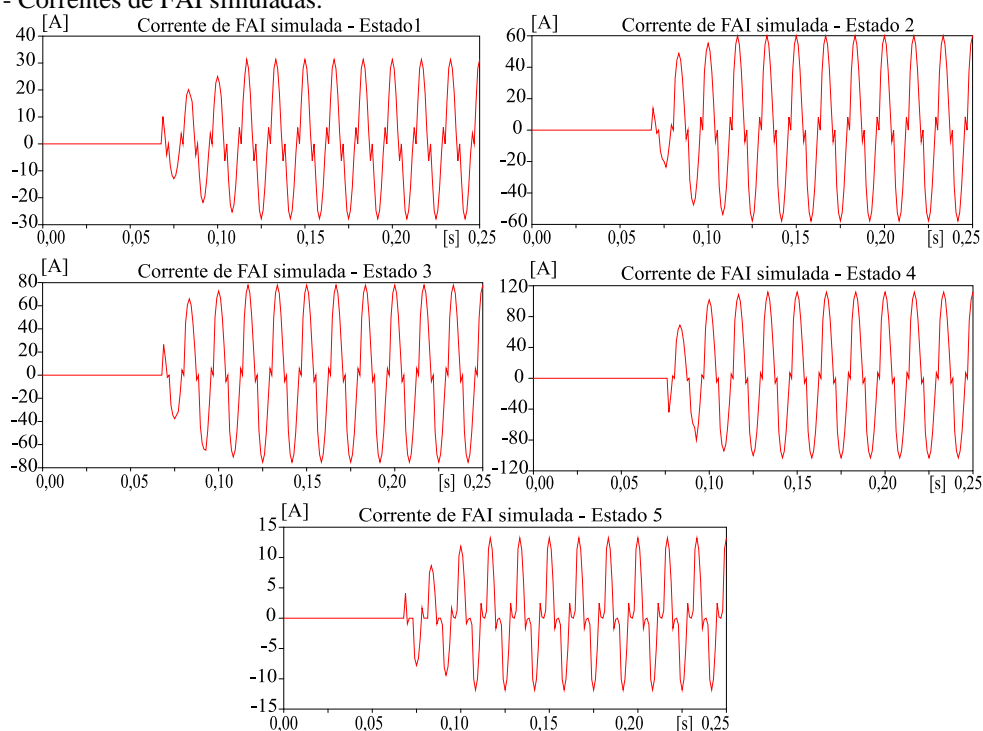
É notório, também, o crescimento da amplitude da corrente de defeito, caracterizando a fase de *buildup*, própria das FAIs. Essa variação está relacionada a fatores como acomodação do condutor ao solo, ou pelo fato de que, quando o condutor entra em contato com determinada superfície, surgem pequenos arcos que criam um caminho de ionização e que se distribuem progressivamente.

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de FAI e seus arcos.

Estado	Parâmetro	Arco 1	Arco 2	Arco 3	Arco 4	Arco 5
1	t	0,062	0,077	0,1	0,114	0,083
	Rp	1000	2900	3500	3700	4000
	Rn	1200	3000	3550	3750	4010
	Vp	4000	8000	7500	10000	490
	Vn	4500	8100	7600	10500	510
2	t	0,06	0,073	0,093	0,112	0,079
	Rp	900	2800	2500	2100	800
	Rn	905	2850	2550	2150	805
	Vp	1800	3000	4000	10000	2000
	Vn	1900	3500	4500	11000	2500
3	t	0,057	0,075	0,09	0,11	0,077
	Rp	500	2000	2500	1800	1000
	Rn	505	2050	2550	1900	1050
	Vp	900	2500	3000	11000	1000
	Vn	1000	2700	3200	11500	1100
4	t	0,075	0,096	0,111	0,131	0,09
	Rp	280	2000	2500	2700	800
	Rn	300	2500	2700	2750	805
	Vp	750	1800	3000	11300	950
	Vn	900	2800	4000	11500	1050
5	t	0,061	0,066	0,092	0,104	0,086
	Rp	1500	9000	6500	5800	10000
	Rn	1505	9600	7000	6500	11100
	Vp	9000	8000	11000	12000	2000
	Vn	10000	9000	11050	12500	2050

Fonte: Adaptado, Sedighi (2014).

Figura 20 - Correntes de FAI simuladas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

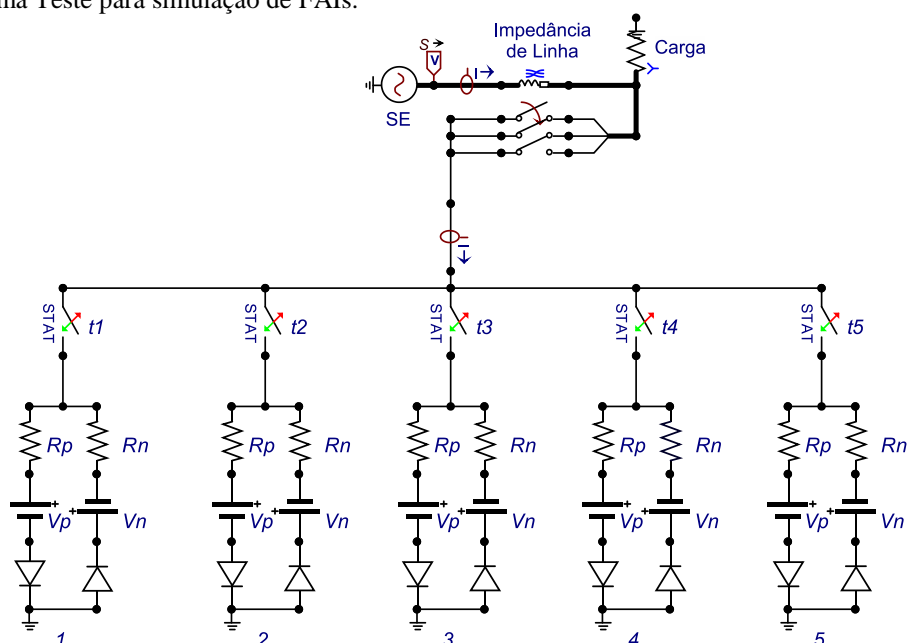
4.2 Sistema teste de simulação de uma FAI

A fim de simular e validar a técnica proposta foi montado um sistema teste, conforme a Figura 21, utilizando o software EMTP-ATP®, o qual é composto por um alimentador radial de distribuição que se conecta ao modelo de arco elétrico através de três interruptores que possibilitam arbitrar qual das três fases do sistema estará sofrendo a falta de alta impedância. Esse sistema engloba uma subestação que opera em 13,8 kV, uma carga resistiva de 9522Ω , bem como impedâncias de linha de $0,4 + j0,8 \Omega/m$ para sequência zero e $0,2 + j0,4 \Omega/m$ para sequência positiva. Para o tempo de fechamento da chave adotou-se 0,03 segundos.

Inicialmente, para cada um dos cinco estados do modelo de arco elétrico foram simulados os casos de FAI, variando a distância do alimentador a cada 250 metros até que sua distância total de 5000 metros fosse percorrida. Além disso, para cada estado e cada metragem, utilizaram-se diferentes valores de amostragens, sendo elas: 16, 32, 64, 96 e 128 amostras/ciclo. Todos os casos foram reproduzidos para uma falta na fase A, onde a chave 1 encontra-se fechada. Dessa maneira, um total de 500 casos de FAI foram simulados e seus respectivos sinais oscilográficos de corrente foram obtidos.

Tendo construído esse banco de dados, foi possível fazer a identificação de anomalias, fazer a análise da envoltória, extrair os índices d_1 , d_2 e d_3 , e, finalmente, fazer a classificação do sistema com o auxílio da metodologia proposta, a qual fundamenta-se na lógica fuzzy.

Figura 21 – Sistema Teste para simulação de FAIs.

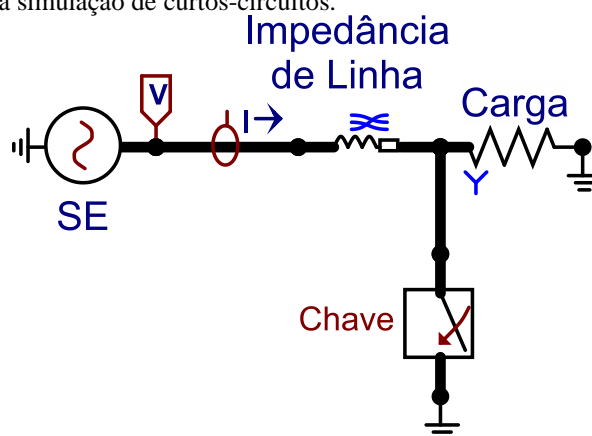


Fonte: Adaptado, Sedighi (2014).

4.3 Sistema teste de simulação de um curto-circuito

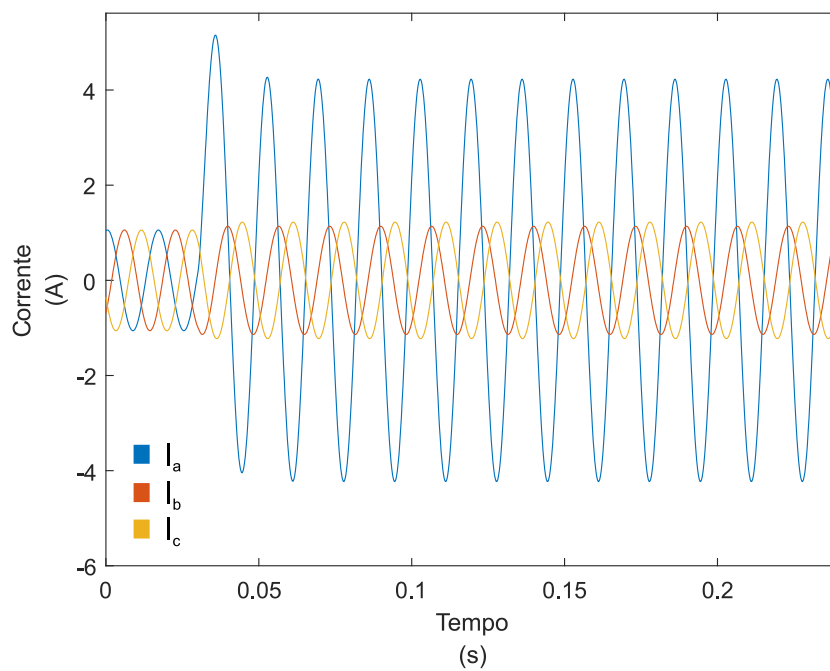
O sistema teste utilizado para a simulação de curto-circuito, consiste no mesmo sistema radial de distribuição apresentado anteriormente, porém, sem o modelo de arco elétrico acoplado, conforme ilustra a Figura 22. Foram simulados casos de curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico para diferentes pontos da rede, os quais podem ser visualizados nas Figura 23 a 25, respectivamente.

Figura 22 – Sistema de teste para simulação de curtos-circuitos.



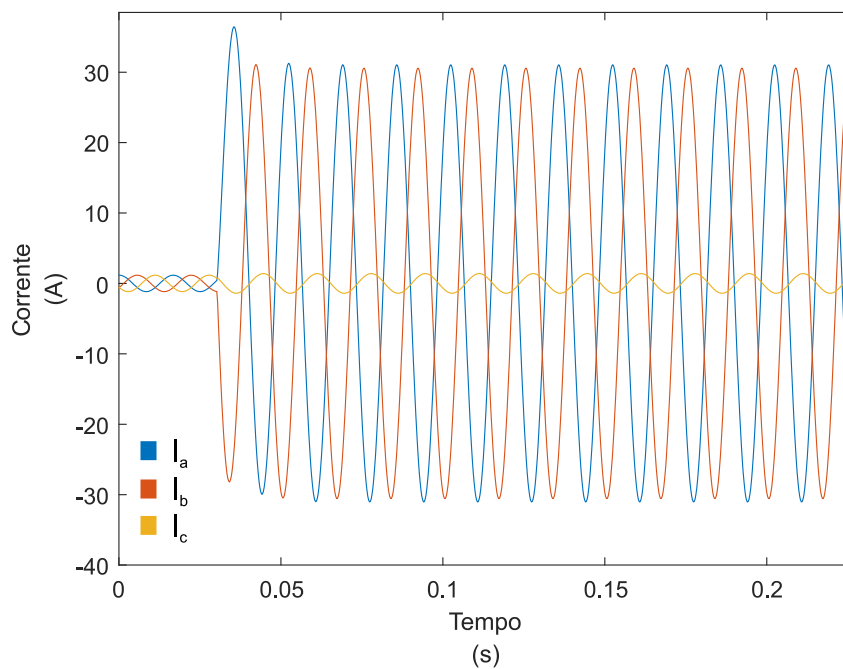
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 23 – Sinais de corrente para um curto-circuito monofásico.



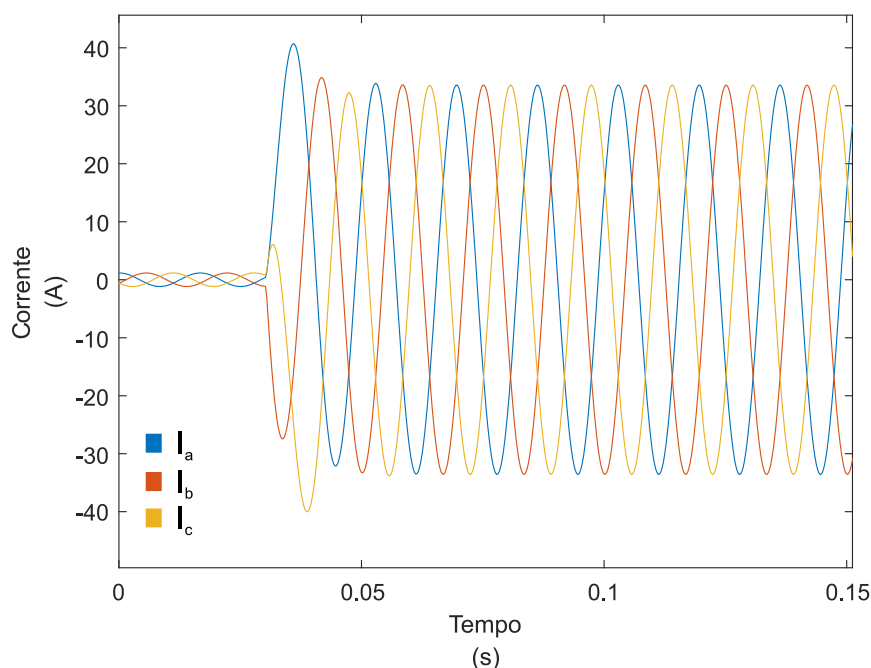
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 24 - Sinais de corrente para um curto-circuito bifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 25 - Sinais de corrente para um curto-circuito trifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para todos os sinais de curto-circuito gerados pelo sistema teste, a técnica de análise da envoltória foi executada, a qual atuou de forma correta, detectando o comportamento decrescente desses casos, contribuindo assim, para discriminar os diferentes tipos de anormalidades que ocorrem no sistema dos casos de FAI.

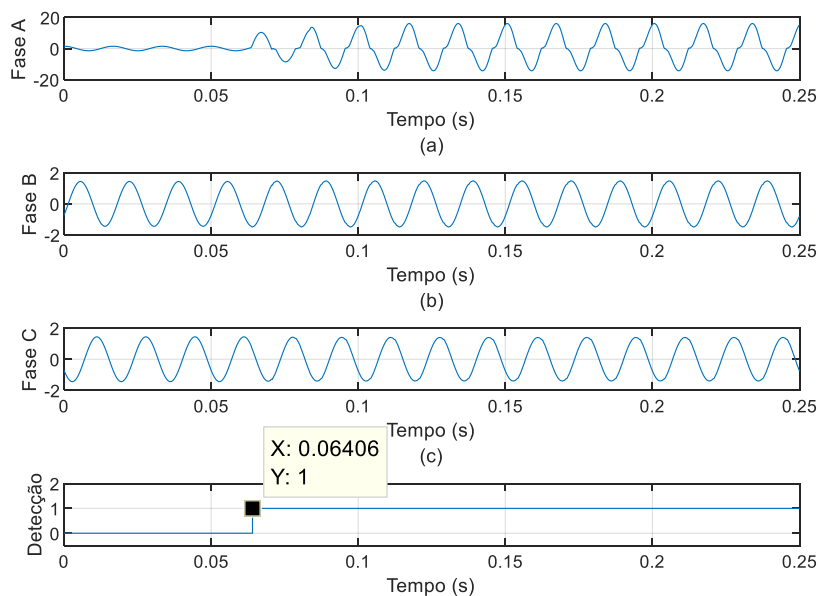
4.4 Análise dos Resultados

Para tratar os sinais gerados pelo ATP e implementar os algoritmos, foi utilizado o programa MATLAB®, onde a técnica de detecção e classificação, bem como a da envoltória, foi aplicada para os 500 casos de FAI simulados, a fim de validar a metodologia proposta. Obteve-se um percentual de acertos na ordem de 100% para as amostragens de 64, 96 e 128. Já as amostragens de 16 e 32 amostras/ciclo apresentaram um desempenho um pouco inferior. A seguir, é detalhado um dos casos de FAI para a fase A, apresentando a característica de sua envoltória, bem como, o tempo levado para a sua detecção e classificação. Além disso, o mesmo é feito para casos de FAI ocorridas nas fases B e C do sistema, a fim de provar o funcionamento das outras regras estabelecidas pela lógica fuzzy. Por fim, um caso em que o sistema normalmente também é apresentado.

4.4.1 Caso 1: FAI na fase A

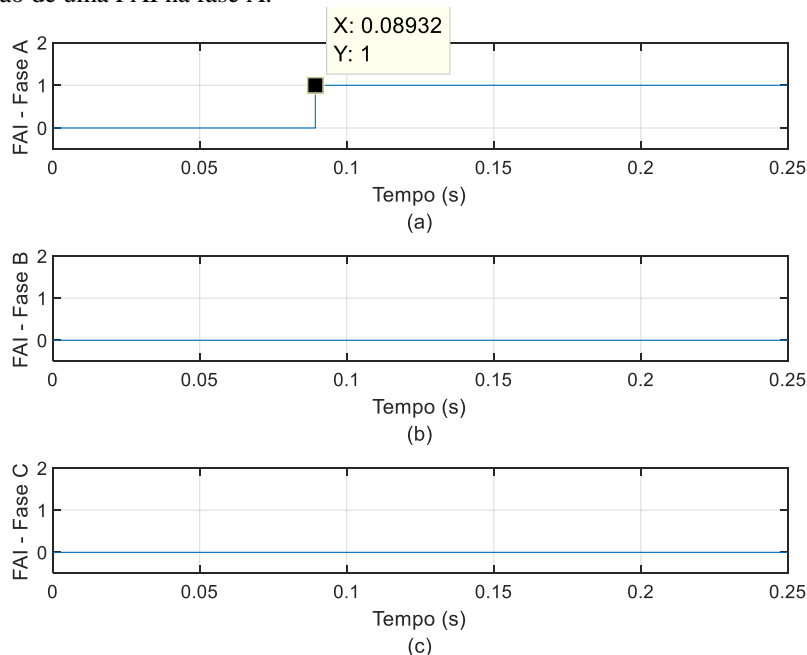
Para uma FAI simulada na fase A (Figura 26), obteve-se $d_1 = 0,9015$, $d_2 = 0,0904$ e $d_3 = -0,9919$, valores que equivalem, respectivamente, a PG, PP e NG estabelecidos pela primeira regra da lógica fuzzy. O instante de tempo em que o método detectou a existência de anomalias no sinal foi de 0,06406 s exatamente. Já a classificação da anomalia ocorreu no instante de 0,08932 s (Figura 27). Sendo 0,02526 s o tempo que o algoritmo levou para classificar o sistema como FAI na fase A, após a identificação da anormalidade e da análise da envoltória, mostrada na Figura 28, a qual apresenta característica crescente.

Figura 26 – Detecção de uma FAI na fase A.



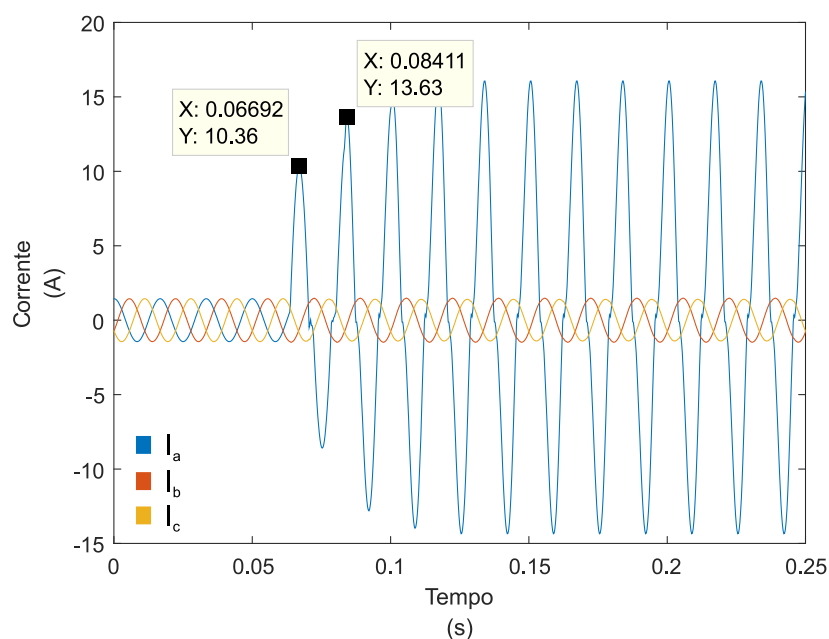
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 27 – Classificação de uma FAI na fase A.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 28 – Característica da envoltória de uma FAI na fase A.



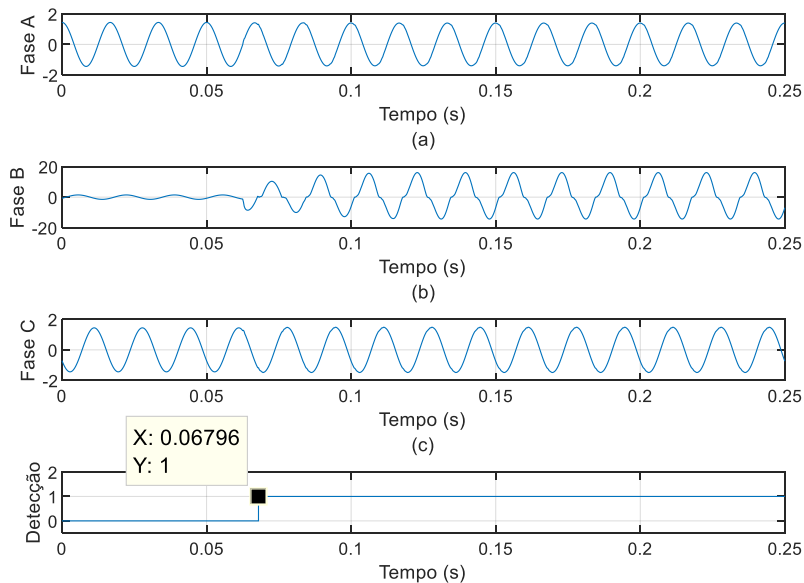
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.4.2 Caso 2: FAI na fase B

Para uma situação de FAI ocorrida na fase B do sistema, obtiveram-se os índices $d_1 = -0,9920$, $d_2 = 0,9022$ e $d_3 = 0,0898$, caracterizando a segunda regra estabelecida pela lógica nebulosa, equivalente a NG, PG e PP, respectivamente. Neste caso, os instantes de detecção e classificação foram de 0,06796 e 0,09322 segundo, respectivamente, conforme consta nas

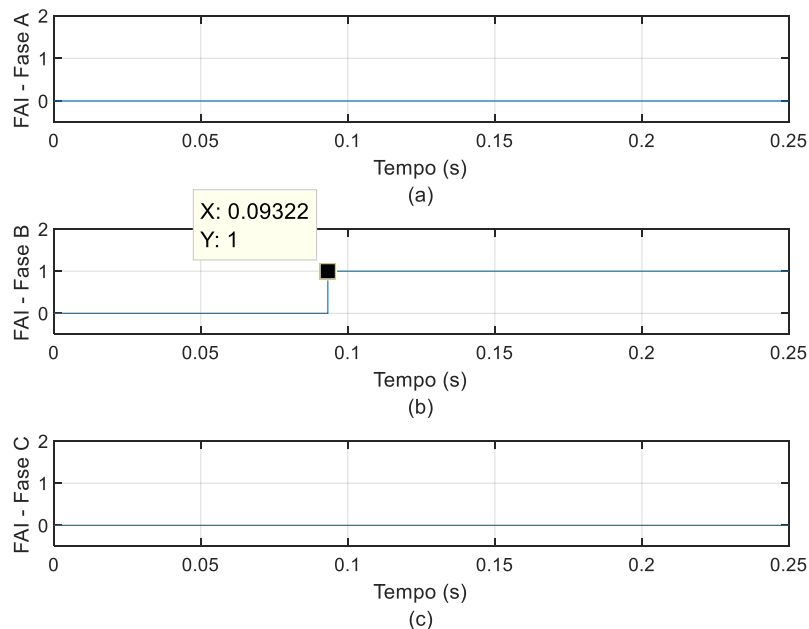
Figura 29 e 30, sendo a diferença entre esses instantes igual 0,02526 s. A envoltória crescente desse sinal pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 29 - Detecção de uma FAI na fase B.



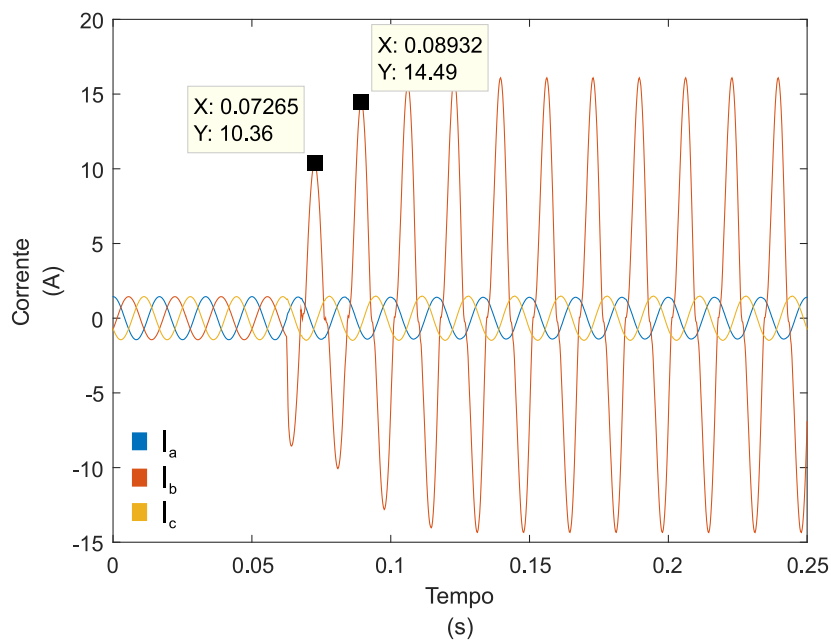
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 30 - Classificação de uma FAI na fase B.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 31 - Característica da envoltória de uma FAI na fase B.

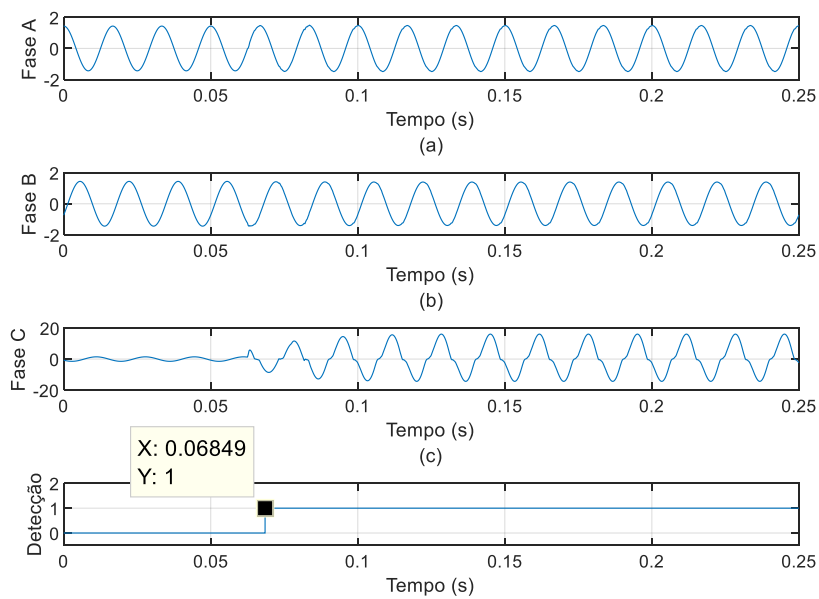


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.4.3 Caso 3: FAI na fase C

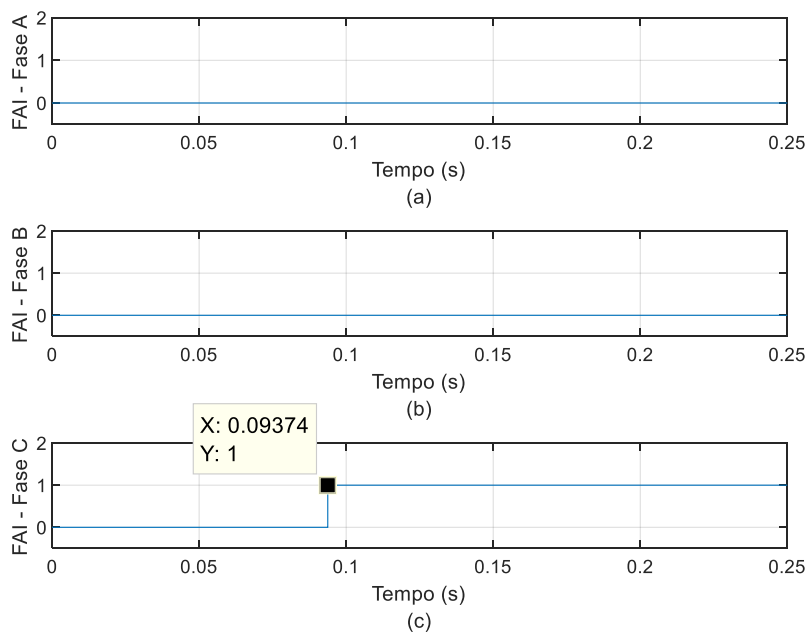
Neste caso, foi simulada uma FAI ocorrida na fase C do sistema, a qual representa a terceira regra definida pela lógica fuzzy, onde os índices d_1 , d_2 e d_3 equivalem a PP, NG e PG, sendo 0,0902, -0,9919 e 0,9018 seus respectivos valores correspondentes. As Figura 32 e 33 representam essa situação e indicam o tempo de 0,06849 s, no qual o método fez a detecção da anomalia, e 0,09374 s, instante em que a metodologia classifica o evento como FAI na fase C. Neste caso, a diferença entre os dois instantes mencionados foi de 0,02525 s. A envoltória característica para esse caso pode ser observada na Figura 34.

Figura 32 - Detecção de uma FAI na fase C.



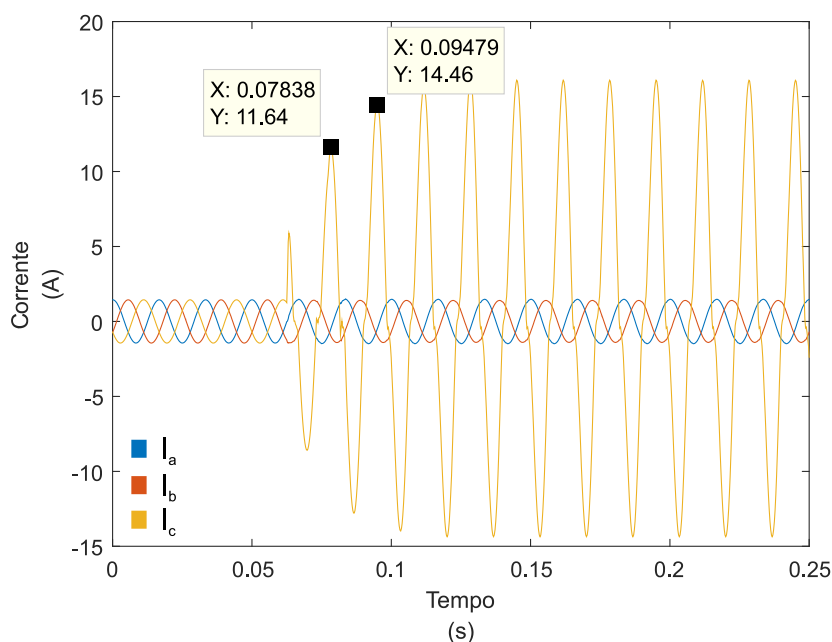
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 33 - Classificação de uma FAI na fase C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 34 - Característica da envoltória de uma FAI na fase C.

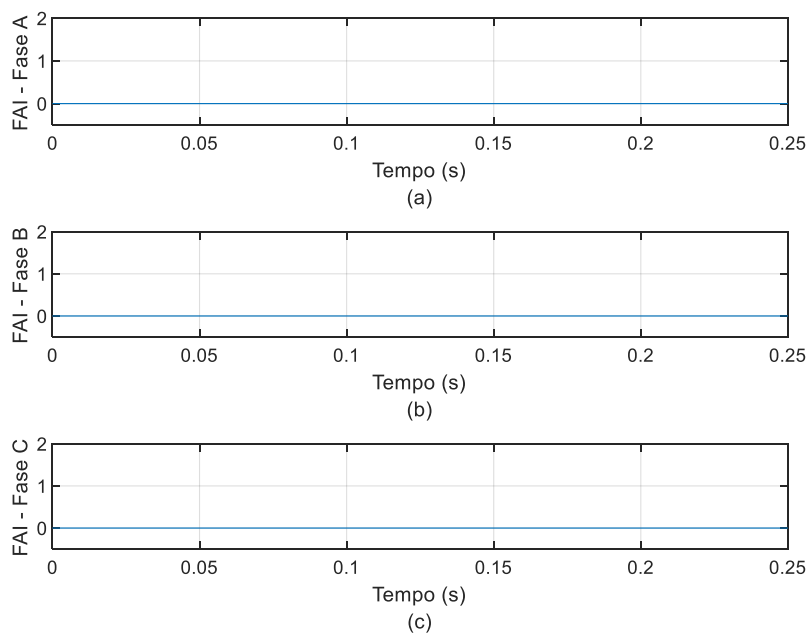


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.4.4 Caso 4: Operação Normal do Sistema

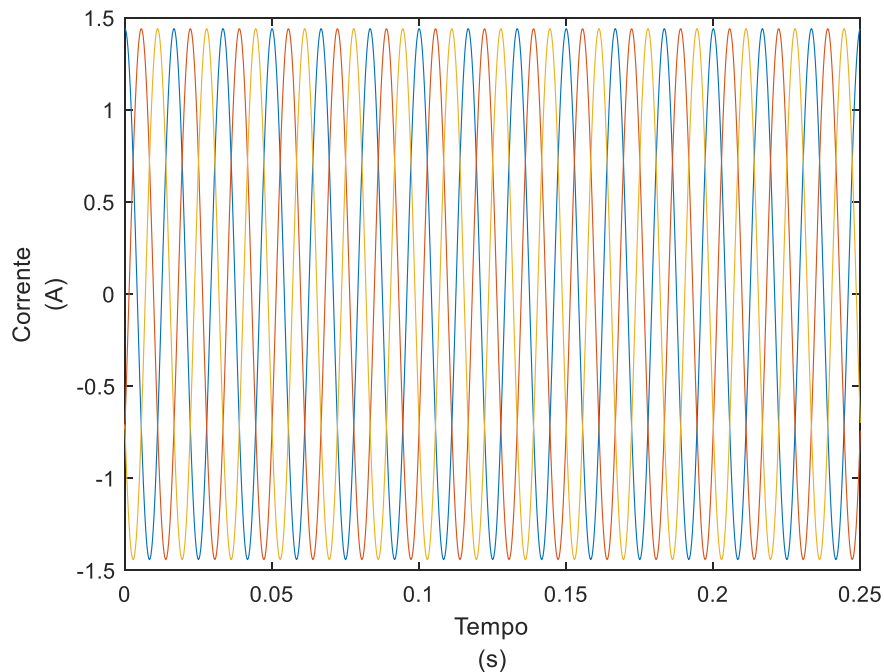
Além dos casos de FAI nas três fases do sistema, foi simulado um caso em que o mesmo se encontra em estado normal de operação, ou seja, sem nenhum tipo de perturbação, o qual deve contemplar a última regra estabelecida. Para esta situação, tem-se $d_1 = 0,0021$, $d_2 = -0,0011$ e $d_3 = -0,0011$, valores que correspondem ao conjunto ZE, ZE e ZE. Por conta disso, como mostra a Figura 35, para nenhuma das fases o sistema alterou seu estado de “zero” para “um”, logo, não há detecção de anomalias em nenhuma das fases, indo de acordo com a condição de operação normal do sistema. A envoltória do sinal pode ser vista na Figura 36, a qual apresenta característica constante, sem variação crescente ou decrescente na magnitude das correntes.

Figura 35 – Sistema operando em condição normal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 36 – Envoltória do sinal de corrente do sistema operando normalmente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.5 Considerações Finais

O modelo de arco com diodos antiparalelos apresentado neste Capítulo foi acoplado ao sistema teste abordado neste Trabalho, reproduz as características inerentes a uma FAI. Além disso, foram especificados os parâmetros utilizados para a realização das simulações, bem como

foram apresentados os resultados obtidos na aplicação da metodologia de detecção, análise da envoltória e classificação do sistema, as quais se mostraram eficientes e robustas para a tarefa à qual são destinadas.

O Capítulo seguinte apresenta as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

O problema relacionado às faltas de alta impedância nas redes de distribuição de energia elétrica ainda é motivo de muita preocupação no setor elétrico, em razão dos riscos impostos aos seres vivos e as perdas às concessionárias. Isto ocorre devido a características de baixa corrente de curto-circuito, as quais são incapazes de sensibilizar as proteções de sobrecorrente convencionais, agravadas ainda mais pelo comportamento aleatório desse tipo de fenômeno. Este trabalho apresenta temas relacionados às FAIs, abordando suas principais causas, classificações, características, consequências, dificuldades e alguns métodos existentes na literatura para sua representação e detecção.

Dentre os métodos existentes, as técnicas que utilizam dispositivos mecânicos instalados ao longo dos alimentadores mostram-se eficientes na sua detecção, porém, apresentam um custo muito elevado de implementação a longa escala. Com isso, as técnicas baseadas em sinais obtidos nas subestações vêm ganhando destaque, mas ainda enfrentam problemas relacionados ao conteúdo harmônico presente nesses sinais, podendo provocar uma detecção incorreta. Diante disso, vê-se a necessidade da implementação de técnicas confiáveis e robustas, que façam a detecção das FAIs de forma correta e eficiente.

A metodologia de detecção e classificação de FAIs apresentada nesse trabalho mostrou-se satisfatória, visto que para todos os casos simulados em três amostragens diferentes o método atuou de forma correta em todos os casos analisados, identificando as anormalidades do sinal e classificando-os conforme as regras estabelecidas com o auxílio da lógica fuzzy. Além disso, o tempo que o algoritmo demandou para que a falta fosse reconhecida e rotulada como uma FAI foram de apenas alguns milésimos de segundo, na ordem de 25 ms.

Por fim, o aperfeiçoamento dado à metodologia existente com o uso do modelo de arco elétrico integrado ao sistema teste, mostrou-se satisfatório e eficiente visto que as principais particularidades envolvidas na ocorrência de uma FAI foram evidenciadas e podem auxiliar muito na identificação desse tipo de evento. Por isso devem ser analisadas e levadas em consideração. Ainda, a técnica utilizada para fazer a análise da envoltória, permitiu diferenciar as situações de curto-circuito das FAIs, contribuindo para que diferentes distúrbios ocorridos no sistema não sejam confundidos como casos de FAI, permitindo assim uma classificação mais confiável e segura desse fenômeno.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, citam-se:

- Analisar o desempenho da técnica proposta para o processamento de sinais simulados com outros modelos de arco elétrico; e
- Desenvolver novas técnicas para classificação de FAIs, com auxílio de outras ferramentas computacionais e matemáticas de processamento de sinais.

REFERÊNCIAS

- AUCOIN, M.; RUSSELL, B. D.; BENNER, C. L. High Impedance Fault Detection For Industrial Power Systems. **Mycological Research**, p. 5, 1989.
- BARROS, A. C. **Detecção e Classificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas Elétricos de Potência Usando Lógica Fuzzy**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2009.
- CAMPUS/ELETOBRÁS. **Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**. Volume 2 ed. Rio de Janeiro: [s.n.].
- DARWISH, H. A.; ELKALASHY, N. I. **Universal Arc Representation Using EMTP**, 2005. (Nota técnica).
- DECANINI, J. G. “ Detecção e Classificação de Falhas de Curto-Circuito em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Lógica Nebulosa ” Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automa. p. 110f, 2008.
- ELKALASHY, N. I. et al. **Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks**, 2006. (Nota técnica).
- EMANUEL, A. E. et al. High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15kV Distribution Feeders: Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, p. 11, 1990.
- FANUCCHI, R. Z. **A Detecção e a Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais**. [s.l.] Universidade de São Paulo - USP, 2014.
- FARIAS, P. E. **Detecção e Classificação de Transitorios em Redes de Distribuição para Identificação de Falhas de Alta Impedância**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2013.
- FILOMENA, A. D. **Localização de Defeitos em Alimentadores Primários Subterrâneos: Formulação Estendida Baseada na Impedância Aparente**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- GARCIA, M. A. **A Modelagem de Cargas Especiais (não-lineares) para Estudos Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica Via o Software ATP**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010.
- JÚNIOR, D. A. DE O. **Falhas de Alta Impedância : Detecção e Localização de Rompimento de Condutores em Circuito Primário de Redes Aéreas de Distribuição Baseado em Desequilíbrio de Tensão**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- KIZILCAY, M.; SETA, P. LA. Digital Simulation of Fault Arcs in Medium-Voltage Distribution Networks. **Test**, n. August, p. 7, 2005.
- LEITE, M. P. **Identificação e Localização de Falhas de Alta Impedância Utilizando**

Medidores Inteligentes. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2017.

MICHALIK, M. et al. **High-Impedance Fault Detection in Distribution Networks With Use of Wavelet-Based Algorithm.** [s.l.: s.n.].

NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.

NAM, S. R. et al. A Modeling Method of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-Varying Resistances in EMTP. **2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)**, v. 2, p. 6, 2001.

NETO, R. DE A. P. **Sistemas para Detecção de Falta de Alta Impedância e de Rompimento de Condutores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2005.

OLIVEIRA, H. M. DE; FALK, T. H.; TÁVORA, R. F. G. **Decomposição de Wavelets Sobre Corpos Finitos**, 2002. (Nota técnica).

SEDIGHI, A. **A New Model for High Impedance Fault in Electrical Distribution Systems**, 2014. (Nota técnica).

SHEBL, K. M. et al. **A Combined MODELS-TACS ATPdraw General Model of the High Impedance Faults in Distribution Networks.** Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference. **Anais...2010**

SHENG, Y.; ROVNYAK, S. M. Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 2, p. 533–536, 2004.

STEIN, H. **Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição de Média Tensão.** [s.l.] Universidade Federal do Pampa, 2015.

TORRES, VICENTE G. ; RUIZ, H. F. High Impedance Fault Detection Using Wavelet Transform. **Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)**, p. 1–6, 2011.

VICO, J. et al. **High Impedance Fault Detection on Rural Electric Distribution Systems.** High Impedance Fault Detection On Rural Electric Distribution Systems. **Anais...2010**

VIJAYACHANDRAN, G.; MATHEW, B. K. **High Impedance Arcing Fault Detection in MV Networks Using Discrete Wavelet Transform and Artificial Neural Networks.** 2012 International Conference on Green Technologies, ICGT 2012. **Anais...2012**