UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Gabriela Nunes Lopes

**Diagnóstico de Falhas de Alta Impedância em Sistemas
de Distribuição de Energia Elétrica Empregando
Técnicas de Processamento de Sinais**

São Carlos – SP
2020

Gabriela Nunes Lopes

**Diagnóstico de Falhas de Alta Impedância em Sistemas
de Distribuição de Energia Elétrica Empregando
Técnicas de Processamento de Sinais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São
Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestra em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Assoc. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos – SP

2020

**Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

L864d Lopes, Gabriela Nunes
 Diagnóstico de Falhas de Alta Impedância em
Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Empregando
Técnicas de Processamento de Sinais / Gabriela Nunes
Lopes; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior.
São Carlos, 2020.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de
Concentração em Sistemas Elétricos de Potência --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2020.

 1. Falta de Alta Impedância. 2. Transformada de
Fourier. 3. Transformada Stockwell. 4. Transformada
Wavelet. 5. Sistemas de Distribuição. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **GABRIELA NUNES LOPES**.

Título da dissertação: "Diagnóstico de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica empregando técnicas de processamento de sinais".

Data da defesa: 16/07/2020

Comissão Julgadora:

Resultado

Prof. Associado **José Carlos de Melo Vieira Júnior**
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Aprovada

Prof. Dr. **José Rubens Macedo Junior**

(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Aprovada

Prof. Dr. **Benemar Alencar de Souza**

(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:

Prof. Titular **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

*À minha irmã, Natália Nunes Lopes, por ser minha melhor amiga, conselheira e grande fonte de
inspiração.*

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação foi fomentada pelo processo nº 2018/14242-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Adicionalmente, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Salienta-se o apoio provido pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), por fornecer o local onde foi realizada esta pesquisa.

Gostaria de agradecer aos autores do trabalho Macedo *et al.* (2015), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), principalmente ao professor José Rubens Macedo Júnior, pela disponibilização dos dados de falta de alta impedância que foram fundamentais para esta dissertação.

De maneira pessoal, agradeço a meus pais Edna e Walison, por sempre me apoiarem em todas as escolhas e serem fonte de inspiração de superação, além da minha irmã, Natália, para quem esta dissertação é dedicada. Meus agradecimentos também aos meus tios e padrinhos Nilza e Donizete por sempre estarem presentes em minha vida.

Meu muito obrigada aos amigos do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), principalmente a Thiago Menezes, Luiz Trondoli, Gustavo Santos e Vinícius Lacerda pela grande contribuição que proveram na realização deste trabalho. Agradeço, ainda, às pessoas que fizeram a permanência em São Carlos muito mais agradável: Thiago Machado, Jéssica Alves, Jonas Villela, Daniella Martins, Priscila Costa, Rafael Leite, André Pessoa, Vinícius Valério, Ciniro Nametala, Wandry Rodrigues, Fernando Arduini, Iago Moura, Guilherme Yuji, Gabriella Pinheiro e Gabriela Campos. Também, aos meus amigos de infância, Melina Rafaela e Evandro Bueno, e meus amigos desde a graduação, como Mateus Sachetti, Janne, Machsuel, Ariela, Gustavo, Lucas Araújo, Marina Timo, Thamires, Gabriela de Matos, Isnarah, Rachel, Polyana, Rafael Taques e Tisciane.

Agradeço ao meu ex-orientador que me conferiu todos os caminhos para chegar até aqui, o Prof. Dr. Arnulfo Barroso de Vasconcellos. Por fim, destaco minha gratidão a meu atual orientador Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, por toda a paciência, pela enorme disponibilidade e pela ampla gama de ensinamentos que me transmitiu durante esses dois anos de mestrado.

RESUMO

LOPES, G. N. **Diagnóstico de Falta de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Empregando Técnicas de Processamento de Sinais**. 96 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

A detecção da Falta de Alta Impedância (FAI) em Sistemas de Distribuição (SDs) é uma tarefa árdua que atrai o interesse de empresas e pesquisadores em todo o mundo. A aleatoriedade e a possibilidade de ambiguidade em relação a outros transitórios e a pequena amplitude da forma de onda da corrente de FAI, conferem objeção à rápida e exata detecção pelos métodos tradicionais de proteção. Também, ressalta-se que os possíveis danos aos equipamentos da rede de média tensão, bem como riscos às pessoas e animais, estão associados à ocorrência da FAI e ensejam a busca de novas técnicas e dispositivos de proteção. Contudo, não existe uma solução totalmente eficiente para a identificação deste tipo de falta. Neste contexto, o objetivo desta dissertação é analisar e elaborar o diagnóstico de FAIs por meio de técnicas de detecção baseadas nas Transformadas de Fourier (TF), Wavelet (TW) e Stockwell (TS). Para tanto, realiza-se uma análise crítica e também quantitativa de métricas usualmente utilizadas na bibliografia baseadas nas transformadas mencionadas, além de propor dois novos algoritmos baseados na TS. Os resultados mostraram a necessidade da definição de limites de aplicação das técnicas e da execução de testes dos métodos em relação a outros eventos comuns em SDs, incluindo chaveamento de cargas não lineares, usualmente não abordadas na literatura. Enfim, nota-se que ambos os algoritmos propostos apresentaram resultados promissores, exibindo grande contribuição aos estudos de FAIs em SDs.

Palavras-chave: Falta de Alta Impedância. Transformada de Fourier. Transformada Stockwell. Transformada Wavelet. Sistemas de Distribuição.

ABSTRACT

LOPES, G. N. **High Impedance Fault Diagnosis in Electrical Power Distribution Systems Using Signal Processing Techniques**. 96 p. Master Dissertation – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

The detection of High Impedance Fault (HIF) in Distribution Systems (DSs) is an arduous task that attracts the interest of companies and researchers worldwide. The random behavior, the possibility of ambiguity concerning other transients, and the small magnitude of the HIF current waveform, prevent the quick and effective identification by traditional protection methods. Furthermore, it is emphasized that the possible damage to the medium voltage network equipment, as well as risks to people and animals, are associated with the occurrence of HIFs and give rise to the search for new techniques and protection devices. However, there is no fully efficient solution for detecting this type of fault. Therefore, the goal of this dissertation is to analyze and make the diagnosis of HIFs through detection techniques based on Fourier Transform (FT), Wavelet Transform (WT), and Stockwell Transform (ST). In this regard, this work makes a critical and quantitative analysis of metrics usually used in the bibliography based on the aforementioned transforms, in addition to proposing two new algorithms based on ST. The results proved the need to define the limits of the techniques' applicability and to carry out tests about other frequent events in DSs, including switching of non-linear loads, usually not addressed in the literature. Lastly, it is remarked that both proposed algorithms exhibited promising results, presenting a significant contribution to the studies of HIFs in DSs.

Keywords: High Impedance Fault. Fourier Transform. Stockwell Transform. Wavelet Transform. Distribution Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sequência de eventos da Falta de Alta Impedância (FAI): (a) antes da falta; (b) instante do rompimento; (c) queda do condutor e (d) toque do condutor na superfície.	8
Figura 2 – Divisão das resoluções da TW.	17
Figura 3 – Sistema de testes do IEEE de 34 Barras.	34
Figura 4 – Formas de onda de algumas das correntes de FAIs a partir do contato do condutor com uma superfície de (a) areia, (b) argila, (c) cascalho e (d) asfalto.	36
Figura 5 – Diagrama do esquema de conexão das FAIs ao sistema.	36
Figura 6 – Esquema de ligação das chaves com os capacitores do sistema.	37
Figura 7 – Esquema de ligação das chaves com as cargas do sistema.	38
Figura 8 – Esquema de ligação das chaves com os ramais laterais do sistema.	39
Figura 9 – Forma de onda da corrente registrada durante a energização do transformador.	39
Figura 10 – Circuito de forno a arco simulado.	40
Figura 11 – Diagrama unifilar do retificador modelado para testes.	41
Figura 12 – Forma de onda de corrente com a conexão do retificador.	41
Figura 13 – Ilustração dos índices.	47
Figura 14 – Fluxograma principal do Algoritmo I.	55
Figura 15 – Detecção de FAI com a RSR de 40 dB na barra 802 apresentando a (a) corrente na subestação, (b) o limiar e a variação entre ciclos consecutivos da frequência fundamental, e (c) o limiar e a variação da soma de nove ciclos.	62
Figura 16 – Detecção de FAI com a RSR de 40 dB na barra 848 apresentando a (a) corrente na subestação, (b) o limiar e a variação entre ciclos consecutivos da frequência fundamental, e (c) o limiar e a variação da soma de nove ciclos.	63
Figura 17 – Taxa de detecção das FAIs considerando as 4, 8, 12, 16 e 23 barras mais próximas do ponto de medição com diferentes níveis de ruídos adicionados ao sinal.	64
Figura 18 – Representação da (a) corrente na subestação, (b) o limiar e a variação entre ciclos consecutivos da frequência fundamental, e (c) o limiar e a variação da soma de nove ciclos durante o chaveamento de um ramal lateral com a adição de 40 dB de ruído.	65
Figura 19 – Comportamento dos contadores durante uma (a) FAI e um (b) Chaveamento de Ramal Lateral.	66
Figura 20 – Corrente medida no neutro com uma FAI na barra (a) 802 e (b) 890.	72

Figura 21 – Fluxograma principal do Algoritmo II.	73
Figura 22 – Comportamento da variação e dos limiares da (a) 2 ^a , (b) 3 ^a , (c) 4 ^a e (d) 5 ^a ordens harmônicas da corrente do neutro durante uma FAI com a adição de 30 dB de ruído.	78
Figura 23 – Comportamento dos contadores do método (a) C_n^I , (b) C_n^{II} , (c) C_n^{III} e (d) C_n^{IV} durante uma FAI com adição de ruído de 30 dB.	79
Figura 24 – Comportamento dos contadores do método em relação às fases A, B e C, representados por C_a , C_b e C_c , durante uma FAI com adição de ruído de 30 dB.	79
Figura 25 – Comportamento dos contadores do neutro C_n^I , C_n^{II} , C_n^{III} e C_n^{IV} durante a conexão de (a) banco de capacitores, (b) carga linear e (c) ramal lateral ao sistema com um ruído de 30 dB adicionado aos sinais.	81
Figura 26 – Comportamento dos limiares γ^2 e das variações da segunda ordem harmônica θ^2 em relação às fases (a) A, (b) B e (c) C no chaveamento de um um forno a arco no sistema.	82
Figura 27 – Comportamento dos contadores do método (a) C_a , (b) C_b e (c) C_c na energização de um forno a arco.	83
Figura 28 – Comportamento dos contadores do método (a) C_a , (b) C_b e (c) C_c na energização de um retificador com a adição de ruído de 30 dB.	84
Figura 29 – Comportamento dos contadores do método (a) C_a , (b) C_b e (c) C_c na energização de transformador com ruído de 30 dB.	85
Figura 30 – Variação média de energia para FAIs na barra 848 no sistema teste do IEEE de 34 barras.	96
Figura 31 – Variação média de energia para cada ordem harmônica durante uma FAI no sistema teste.	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros e métricas utilizados em métodos de detecção de FAIs baseados na TF e em filtros.	24
Quadro 2 – Parâmetros e métricas utilizados nos métodos propostos baseados na Transformada Wavelet (TW).	25
Quadro 3 – Parâmetros e métricas utilizados nos métodos de detecção de FAIs da literatura baseados na Transformada de Stockwell (TS).	27
Quadro 4 – Características de testes realizados em métodos de detecção de FAIs baseados na TF e em filtros.	28
Quadro 5 – Características dos testes realizados em proposições de detecção de FAIs baseadas na TW.	29
Quadro 6 – Características de testes realizados em métodos de detecção de FAIs baseados na TS.	29
Quadro 7 – Métricas escolhidas baseadas na Transformada de Fourier	44
Quadro 8 – Métricas escolhidas baseadas na Transformada de Stockwell.	45
Quadro 9 – Métricas escolhidas baseadas na Transformada Wavelet.	45
Quadro 10 – Parâmetros e métricas utilizados nos Algoritmos I e II propostos.	83
Quadro 11 – Características dos testes realizados nos Algoritmos I e II de detecção de FAIs.	85

LISTA DE ALGORITMOS

1	Confirmação da detecção de uma FAI por meio dos contadores do Algoritmo I.	59
2	Confirmação da detecção de uma FAI por meio dos contadores do Algoritmo II.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Valor mediano dos índices de margem e repetição para FAIs sem ruído e com a adição de ruído com RSR igual a 30 dB.	49
Tabela 2	– Porcentagem da taxa de detecção de FAIs pelos índices de margem considerando a distinção de outros eventos.	51
Tabela 3	– Valores dos parâmetros do Algoritmo I.	61
Tabela 4	– Porcentagem de taxa de detecção, tempo médio de detecção e seu desvio padrão em relação ao Algoritmo I com ruídos com RSR de 60, 50 e 40 dB. .	63
Tabela 5	– Porcentagem de detecção, tempo médio de detecção e seu desvio padrão em relação ao Algoritmo II com a adição de ruídos com RSR de 50, 40 e 30 dB.	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BC	<i>Banco de Capacitor</i>
CNL	<i>Carga Não Linear</i>
CL	<i>Carga Linear</i>
CFI	<i>Corrente de Fuga de Isoladores</i>
dB	<i>Decibéis</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
ET	<i>Energização de Transformador</i>
EFA	<i>Energização de Forno a Arco</i>
FFT	<i>Transformada Rápida de Fourier, do inglês Fast Fourier Transform</i>
FAI	<i>Falta de Alta Impedância</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IH	<i>Inter-Harmônico</i>
MODWT	<i>Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform</i>
MS	<i>Máquina de Solda</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
RMS	<i>Valor Efícaz, do inglês Root Mean Square</i>
RSR	<i>Relação Sinal-Ruído</i>
RL	<i>Ramal Lateral</i>
SD	<i>Sistema de Distribuição</i>
SDMT	<i>Sistema de Distribuição de Média Tensão</i>
TF	<i>Transformada de Fourier</i>
TDF	<i>Transformada Discreta de Fourier</i>
TFTC	<i>Transformada de Fourier de Tempo Curto</i>
TW	<i>Transformada Wavelet</i>

<i>TWC</i>	<i>Transformada Wavelet Contínua</i>
<i>TS</i>	<i>Transformada de Stockwell</i>
<i>TSD</i>	<i>Transformada de Stockwell Discreta</i>
<i>TWD</i>	<i>Transformada Wavelet Discreta</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	4
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	4
2	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	7
2.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	7
2.1.1	Classificações das FAIs	7
2.1.2	Características das FAIs	9
2.2	FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADAS À DETECÇÃO DE FAIs	11
2.2.1	Transformada de Fourier	12
2.2.2	Transformada Wavelet	15
2.2.3	Transformada de Stockwell	18
2.3	ESTADO DA ARTE SOBRE DETECÇÃO DE FAIs	21
2.3.1	Técnicas de Detecção de FAIs baseadas na Transformada de Fourier	22
2.3.2	Técnicas de Detecção de FAIs baseadas na Transformada Wavelet	23
2.3.3	Técnicas de Detecção de FAIs baseadas na Transformada de Stockwell	25
2.3.4	Outros Métodos de Detecção de FAIs	27
2.3.5	Análise dos Testes Realizados em Trabalhos de Detecção de FAIs	28
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	METODOLOGIA GERAL DO TRABALHO	33
3.2	METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO DE EVENTOS NO SISTEMA	35
3.2.1	Testes das FAIs de Dados Reais	35
3.2.2	Testes do Chaveamento dos Bancos de Capacitores	37
3.2.3	Testes do Chaveamento das Cargas Lineares do Sistema	37
3.2.4	Testes de Chaveamento dos Ramais Laterais	38
3.2.5	Simulação de Evento Não Linear - Energização de Transformadores	38
3.2.6	Simulação de Carga Não Linear - Forno a Arco	40
3.2.7	Simulação de Carga Não Linear - Retificador	40
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	40

4	ANÁLISE DE MÉTRICAS PROPOSTAS NA LITERATURA	43
4.1	METODOLOGIA DE ANÁLISE	43
4.1.1	Descrição das Métricas Escolhidas	44
4.1.1.1	Métricas Baseadas na Transformada de Fourier	44
4.1.1.2	Métricas Baseadas na Transformada de Stockwell	44
4.1.1.3	Métricas Baseadas na Transformada Wavelet	45
4.1.2	Obtenção dos Índices	45
4.1.2.1	Índices de Margem	46
4.1.2.2	Índices de Repetição	46
4.1.3	Metodologia das Simulações	47
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.2.1	Análise da influência do ruído na detecção da FAI	48
4.2.2	Análise da Taxa de Detecção e Distinção de Outros Eventos	49
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	51
5	PROPOSTA DO ALGORITMO I	53
5.1	METODOLOGIA PROPOSTA	54
5.1.1	Filtragem da Corrente e Extração das Características	54
5.1.2	Cálculo da Variação de Energia das Harmônicas	56
5.1.3	Limiar Auto-adaptativo	57
5.1.4	Confirmação da FAI	58
5.2	TESTES E RESULTADOS	60
5.2.1	Análise do Método na Detecção de FAls	60
5.2.1.1	Análise das FAls na Barra 802	61
5.2.1.2	Análise de FAls na Barra 848	62
5.2.1.3	Testes extensivos	62
5.2.2	Análise do método em relação a falsas operações	64
5.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CONTADORES	66
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	66
6	PROPOSTA DO ALGORITMO II	69
6.1	METODOLOGIA PROPOSTA	70
6.1.1	Filtragem da corrente de neutro e extração das características	71
6.1.2	Cálculo da Variação de Energia das Harmônicas	73
6.1.3	Limiar Adaptativo	74
6.1.4	Algoritmo de detecção	75
6.2	TESTES E RESULTADOS	77
6.2.1	Avaliação do método para detecção de FAls	77
6.2.2	Avaliação da distinção de outros eventos	80
6.3	Comparação dos Algoritmos Propostos	82

6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	86
7	CONCLUSÕES	87
7.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A AVALIAÇÃO DAS HARMÔNICAS NOS SINAIS DE FAIS . .	95

INTRODUÇÃO

No contexto da proteção de Sistemas de Distribuição (SDs), as Falhas de Alta Impedância (FAIs) são consideradas um fator problemático, visto que implicam em efeitos perigosos se não forem identificadas e extintas em tempo hábil. A corrente associada à FAI é usualmente insuficiente para detecção por meios convencionais, como relés e fusíveis, pois apresenta amplitudes próximas ou inferiores às correntes de carga de um Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT), que é o tipo de sistema que será o foco em toda a abordagem deste trabalho.

A incidência de FAIs está muitas vezes associada aos casos em que redes elétricas têm contato com superfícies pouco condutoras, como árvores, rodovias, areia, grama ou construções (DEPEW *et al.*, 2006; SANTOS *et al.*, 2017; LIMA *et al.*, 2016). Os cenários mais comuns para que estas situações ocorram são pautados em falhas de isolamento, como degradação do cabo devido à umidade, contaminação de isoladores e defeitos na blindagem externa do cabo de proteção (ALI *et al.*, 2016).

Dentre os principais problemas relacionados à FAI, destaca-se a possibilidade de danos às propriedades e equipamentos, uma vez que o alto potencial elétrico gerado nesta situação pode causar aquecimento e até combustão dos materiais utilizados em sua fabricação. Ademais, dado o risco de choque elétrico, FAIs podem ocasionar queimaduras e eletrocussão de pessoas e animais (SANTOS *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2013; NAKAGOMI, 2006). Adicionalmente, pode haver comprometimento da integridade do SDMT devido à possível interrupção do fornecimento de energia elétrica de consumidores. Deste modo, índices de duração e frequência de interrupção, que são usados para o cálculo da qualidade do serviço de distribuidoras de energia elétrica são passíveis de aumento. No Brasil, se esses índices excederem um certo limite, as distribuidoras são penalizadas (ANEEL, 2017). Logo, no âmbito da qualidade da energia elétrica, a FAI também é uma preocupação.

De acordo com Santos *et al.* (2017), as FAIs têm sido repetidamente referidas como uma das principais causas de mortes nas redes de distribuição de energia elétrica brasileiras. Em

2013 e 2014, por exemplo, elas foram a terceira maior causa de acidentes, resultando em 30 e 53 mortes, respectivamente, destacando a necessidade da elaboração de técnicas mais eficientes de detecção e localização desse tipo de falta. Exemplo disto, em 2009, na província de Victoria, na Austrália, ocorreram incêndios de grandes proporções causado por FAIs, que resultaram em mais de 170 mortes e bilhões de dólares em prejuízos financeiros diversos (2009 Victoria Bushfires Royal Commission, 2010). Isto posto, conclui-se que a FAI não pode ser negligenciada e algumas ações devem ser realizadas para que este tipo de falta seja suprimida em tempo hábil (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017; NAKAGOMI, 2006). No entanto, mesmo com o esforço dos fabricantes de equipamentos de proteção, os relés comerciais são capazes de identificar apenas de 50% a 60% das FAIs (NAM *et al.*, 2001).

Assim, visando contribuir para o aumento da identificação de FAIs e desenvolver um método de detecção, deverão ser seguidos alguns pressupostos. Normalmente, qualquer sistema elétrico possui dois estados de operação: o são e o sob falta. Para identificar quando o sistema muda de estado, normalmente é realizada uma classificação dos padrões para enfatizar as características comuns. De acordo com Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017), este processo é composto por três passos:

- Medição;
- Análise: extração de características;
- Classificação: definição de limites.

Em vista disto, foram desenvolvidas ao longo dos anos diversas técnicas para a detecção de FAIs. A extração de dados (medição) acontece por meio do registro de sinais elétricos durante a falta. A análise destes sinais pode ser realizada por meio de técnicas de processamento de sinais no domínio da frequência, tempo ou ambos, uma vez que o arco elétrico que ocorre durante a FAI implica em não-linearidade destas formas de onda (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017). Após a extração de parâmetros podem ser criados métodos para a detecção de FAIs e sua classificação por meio do estabelecimento de limiares. A robustez ou resolução dos métodos é confirmada por meio de testes com adição de ruídos aos sinais, variando características da falta e realizando testes com outros eventos comuns em um SDMT.

Uma vez que FAIs causam não linearidade entre os sinais de tensão e corrente registrados durante sua ocorrência, diversas técnicas de processamento de sinais são utilizadas em propostas de métodos para detecção. Uma destas é a Transformada de Fourier (TF), que é empregada para prover os componentes harmônicos e Inter-Harmônicos (IHs), presentes nos sinais de FAIs devido à não linearidade entre tensão e corrente promovida pela variação aleatória do comprimento e, conseqüentemente, da resistência do arco elétrico (GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2017; LIMA *et al.*, 2018b). Além desta, uma outra técnica muito empregada para detecção de FAIs é a Transformada Wavelet (TW), que provê os componentes de alta e baixa frequência por meio

de suas resoluções, e é muito utilizada por indicar modificações rápidas em sinais, situação recorrente nesta modalidade de falta (BELKA; MICHALIK, 2004; ALI *et al.*, 2016; NASON; SAWCZENKO, 2001). Ademais, nos últimos anos, a Transformada de Stockwell (TS) surgiu como uma hábil ferramenta para detecção de faltas, pois é considerada uma evolução da junção entre a TW e a TF. Suas particularidades estão pautadas na habilidade de observar as frequências como a TF, mas por meio de uma janela Gaussiana, além de empregar uma *Wavelet*-mãe multiplicada por um fator de fase, assim como a TW (BISWAL; DASHB, 2013; SAMANTARAY; PANIGRAHI; DASH, 2008; LIMA; BRITO; SOUZA, 2019).

Apesar de todas as técnicas disponíveis e a variedade de métodos propostos na literatura, a aleatoriedade das características do arco elétrico aumenta a complexidade de estabelecer métodos de detecção de FAIs que se estendam a aplicações amplas. Portanto, embora exista uma extensa gama de métodos de detecção de FAIs, não há solução geral, uma vez que cada método utiliza testes com modelos específicos da falta, em diferentes SDs de média tensão e com diversos testes de validação, tornando complexo o estabelecimento de um método geral para aplicação dessas técnicas de detecção. Assim, torna-se necessário analisar as metodologias propostas sob as mesmas condições para que possam ser comparadas. Portanto, um dos objetivos dessa dissertação é identificar as principais métricas propostas na literatura recente baseadas na TF, TW e TS, e avaliá-las da mesma perspectiva de comparação. Neste trabalho as técnicas serão avaliadas respaldadas em uma revisão crítica e estudos de simulação, relativos à detecção de FAIs utilizando dados reais. Além disso, foi proposto um conjunto de índices de avaliação para analisar as métricas com mais eficiência. Nas análises são considerados testes com a incidência de FAIs em diferentes locais de um SDMT, além da adição de ruídos aos sinais de falta e testes de resolução em relação a outros fenômenos. Os resultados revelaram a necessidade de especificar condições do sistema em que uma técnica é válida, além de demonstrar qual o impacto de cada tipo de teste na detecção por meio dos índices propostos.

Além da análise das diversas métricas propostas na literatura, este trabalho também propõe duas novas técnicas de detecção de FAIs fundamentadas na variação da energia de componentes harmônicas extraídas na TS dos sinais de corrente registrados durante FAIs. Para avaliar estas técnicas, são utilizados testes com outros fenômenos, inclusive cargas não lineares, que usualmente não são testadas em trabalhos prévios com este intuito. Os resultados alcançados implicam em um avanço para a área, pois por meio dos diversos testes realizados, configuram-se duas novas ferramentas promissoras para detecção de FAIs.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho é pautado em dois objetivos gerais. O primeiro é a realização de uma análise crítica e proposição de índices para avaliação de métodos de detecção de FAIs baseados na TF, TW e TS sob uma mesma perspectiva de comparação. Já o segundo objetivo geral é a

proposição de algoritmos de detecção de FAIs baseados na variação de energia de harmônicos de baixa ordem extraídos pela TS dos sinais de corrente registrados na subestação do sistema.

Para que os objetivos gerais sejam alcançados com êxito, os seguintes itens deverão ser satisfeitos:

- **Compreensão do problema:**

- Buscar, na literatura, técnicas convencionais de caracterização e detecção de FAIs, além da modelagem matemática e aplicações de transformadas matemáticas utilizadas para tal. Analisar, em todas essas proposições, quais os testes realizados, a aplicação e quais os aspectos necessitam de contribuição;

- **Caracterização/ Detecção da FAI:**

- Por meio de simulação, caracterizar FAIs e outros eventos comuns em SDs de média tensão para serem realizadas implementações dos métodos propostos na bibliografia recente, bem como para elaborações dos métodos propostos nesta dissertação.

- **Análise:**

- Identificar, com visão crítica, quais são as limitações e contribuições de todas as técnicas elaboradas;

1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Ao serem elaborados os métodos e análises realizadas nesta dissertação, diversas contribuições são alcançadas no estudo de detecção de FAIs em SDs. Elencam-se as principais:

- Facilitação do desenvolvimento de novos métodos de detecção de FAIs por meio do desenvolvimento de índices para a avaliação de técnicas de detecção de FAIs. A partir disso, é realizada uma análise de métricas baseadas em técnicas de detecção de FAIs da literatura por meio de diversos testes. Com isso, é possível que novos métodos alcancem sucesso com maior facilidade.
- São propostos dois novos algoritmos de detecção de FAIs, os quais são submetidos a uma ampla variedade de testes. Ademais, são alcançadas altas taxas de detecção, mesmo com a incidência de FAIs em diversas localizações um SDMT e com a adição de ruídos aos sinais. Ressalta-se que são utilizados dados reais de FAIs e que os sinais são adquiridos em um único ponto de medição.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Com o objetivo de facilitar a assimilação do conteúdo proposto ao leitor, este documento foi organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** apresenta uma visão geral sobre a FAI, explicitando suas classificações, características, os principais métodos empregados para detecção na bibliografia, além de uma análise crítica dos métodos encontrados na literatura baseados na TF, TS e TW;
- **Capítulo 3:** elucida a metodologia empregada neste trabalho, abordando o sistema, o método de realização das simulações e de obtenção de dados, além do modelo de investigação aplicado.
- **Capítulo 4:** expõe a análise das métricas de detecção de FAIs encontradas na literatura por meio de um mesmo plano de comparação propondo o cálculo de índices para tal;
- **Capítulo 5:** apresenta a primeira proposta de algoritmo deste trabalho, baseado na TS;
- **Capítulo 6:** exhibe a metodologia e resultados atingidos pelo segundo algoritmo proposto nesta dissertação, também baseado na TS, com a adição de métodos para distinguir FAIs de outros eventos;
- **Capítulo 7:** expõe as conclusões atingidas, as publicações alcançadas com este estudo, além de apontar quais as possibilidades desta linha de pesquisa para trabalhos futuros.

FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Neste capítulo será apresentado o material teórico acerca das FAIs, englobando suas características, classificações e métodos mais utilizados para detectá-las. Dentre estes, serão apresentadas as transformadas empregadas no processo de pesquisa deste trabalho, desenvolvendo a formulação matemática de cada uma, bem como elucidando o porquê de serem aplicadas para detecção de FAIs. Ainda, será realizada uma avaliação crítica de proposições de detecção de FAIs dispostas na literatura, com o intuito de verificar os testes executados e a importância de realizá-los.

2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Primeiramente, serão apresentados os conceitos gerais sobre a FAI, com o propósito de embasar as considerações que serão efetuadas ao decorrer deste trabalho. Desta forma, este estudo expõe as classificações deste tipo de falta, isto é, os eventos que se decorrem para que a FAI aconteça. Posteriormente, serão apontadas as principais características que estão pautadas na literatura sobre as FAIs.

2.1.1 *Classificações das FAIs*

A ocorrência de uma FAI está associada a uma série de eventos. Deste modo, quando este tipo de falta incide em um SDMT, existem quatro cenários básicos possíveis de ocorrência do evento, uma vez considerados sistemas com somente um ponto de alimentação.

A primeira circunstância consiste na ruptura do condutor e posterior contato com a superfície de alta impedância somente da parte que está conectada com a fonte, à montante da falta. O terceiro caso apresenta o cenário em que, após a ruptura, os condutores de ambos os lados apresentam contato com uma superfície. Por fim, o último cenário exhibe o contato do condutor

energizado com a vegetação. Salienta-se que, neste último caso, não é preciso necessariamente que haja rompimento do condutor (NAKAGOMI, 2006).

Nos trabalhos que investigam as FAIs, é delimitado previamente quais dos tipos de cenários que provocam a sua ocorrência serão utilizados no estudo. Isto acontece uma vez que as características dos parâmetros do sistema elétrico podem se distinguir de acordo com cada um deles. Assim, neste trabalho, o estudo será pautado na queda unicamente do condutor conectado à fonte de alimentação no sistema. Haverá, então, a continuidade da alimentação da corrente de falta após a queda do condutor, o que provoca uma situação perigosa e de características peculiares devido ao arco elétrico formado. Logo, neste caso, é necessário considerar que exista uma sequência de ocorrência do evento da falta. A diretriz adotada está representada na sucessão de eventos apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Sequência de eventos da FAI: (a) antes da falta; (b) instante do rompimento; (c) queda do condutor e (d) toque do condutor na superfície.

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que antes de ocorrer a falta, a corrente que circula na rede é somente produzida para alimentação das cargas do sistema, como ilustrado na Figura 1a. No entanto, quando há o rompimento, há abertura da fase sob falta, instante este ilustrado na Figura 1b. Neste instante poderá ocorrer um arco elétrico de curta duração, que não será considerado neste trabalho. Posteriormente, há um espaço de tempo em que a corrente irá à zero, que é apresentado na Figura 1c, sendo este o tempo entre o rompimento até o momento em que o condutor toca o solo. Por fim, quando o condutor apresenta contato com o solo, como ilustrado na Figura 1d, é iniciado o arco elétrico.

Muitas vezes, o cabo pode encontrar o solo e perder contato até que esteja totalmente acomodado (NAKAGOMI, 2006). Sendo assim, pela probabilidade de não haver acomodação imediata e pela própria definição de FAI, os trabalhos acerca do tema concentram seu objeto de estudo somente após o contato do condutor com o solo, momento em que acontece a ignição do arco elétrico entre o condutor e a superfície de alta impedância. Depois do estabelecimento do arco elétrico, é possível investigar suas diversas peculiaridades. Logo, as características mais importantes previstas na bibliografia sobre os sinais registrados nas FAIs serão elucidadas na próxima subseção.

2.1.2 Características das FAIs

Ao sofrer o contato com algumas superfícies, um condutor energizado tende a produzir arcos voltaicos e corrente de falta, ainda que insuficiente para acionar a proteção convencional de um SDMT (DEPEW *et al.*, 2006). De acordo com Nakagomi (2006), a corrente gerada num arco decorrente de FAI é distorcida, assimétrica, aleatoriamente interrompida e progressivamente variável a cada semiciclo.

Apesar da natureza randômica, FAIs apresentam alguns padrões de comportamento estabelecidos para delimitar o estudo deste fenômeno. Um deles é pautado no fato que qualquer que seja a superfície que apresente contato com o condutor, para se configurar uma FAI, deverá ser de alta resistividade. Alguns exemplos são o contato do condutor com solos compostos de argila, areia, cimento e brita, ou até mesmo no contato com vegetação. Adicionalmente, como uma das principais particularidades da FAI é a formação do arco elétrico, é possível elencar alguns atributos que se destacam no estudo de sua caracterização, são eles (NAKAGOMI, 2006; GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2018):

- Baixa corrente de falta;
- Longa duração;
- Distorção da forma de onda produzida pela não linearidade da resistência de arco;
- Assimetria entre semiciclos;
- O fenômeno da intermitência;
- O *build-up* na forma de onda;
- Aparecimento de *shoulders* nas formas de onda.

O primeiro item observado na FAI é a baixa corrente de falta, que decorre do contato do condutor com uma superfície de alta impedância. Este é o fator que implica na dificuldade em sua identificação. Ainda, verifica-se que este é um fenômeno de longa duração, pois a falta

continua a ser alimentada após a queda do condutor e a duração da FAI dependerá da combustão do material que sofreu contato.

Dentre as características relacionadas à provocação da não-linearidade da corrente de FAI, destaca-se, primeiramente, a distorção da forma de onda que ocorre devido à alta probabilidade de formação do arco elétrico. Esta distorção não linear exerce influência na tensão e corrente registradas durante a ocorrência da FAI. Neste sentido, é ocorrido o segundo item, que é pautado no fato do arco elétrico causar assimetria entre semiciclos da forma de onda, dado que, por apresentar resistência de falta variável, a corrente induzida pela FAI apresentará o mesmo comportamento, alterando seu valor mesmo em tempo inferior a um ciclo.

O fenômeno da intermitência está presente na lista de particularidades, uma vez que o arco elétrico, dependendo das características associadas ao solo em que se obteve contato, nem sempre se mantém estabelecido. Por conseguinte, pode haver extinção com uma posterior re-ignição do arco, gerando intermitência na forma de onda da corrente.

Outra característica associada à ocorrência de FAIs é o fenômeno do *build-up*, o qual ocorre devido ao aumento gradativo da forma de onda da corrente. Ao ser iniciado o arco elétrico, nem sempre será atingido o potencial de ruptura que estabeleça uma corrente de falta. No entanto, quando este potencial é atingido, a corrente se inicia com valor muito próximo de zero e aumenta gradativamente, até que o patamar da corrente de falta seja atingida. Com isto, é obtido o efeito de "acúmulo" na corrente de falta, denominado *build-up*. Por fim, apresenta-se a característica dos *shoulders*, também chamados de patamares. Os *shoulders* representam uma variação mais lenta da resistência de falta, criando modulação na forma de onda, e consistem nos períodos em que o crescimento da corrente é interrompido e em que a constância da amplitude é alcançada.

Em vista das características mencionadas em relação aos aspectos que conferem peculiaridade à forma de onda da corrente, é evidente a sua não linearidade. Ora, se esta é não linear, haverá frequências associadas a estes sinais que possam representar seu comportamento. Tais características podem ser extraídas dos sinais de FAI por meio de cálculos matemáticos, visando a obtenção das frequências e identificação de variações presentes ao longo do tempo. Como exemplo disto, Nakagomi (2006) correlaciona o conteúdo harmônico passível de obtenção a partir de algumas características observadas em sinais de FAIs. Uma delas é o surgimento de harmônicos de baixa ordem devido à distorção da forma de onda de corrente e tensão durante a falta, característica que advém da não-linearidade da resistência do arco. Outra particularidade verificada é o aparecimento de harmônicos de ordem par em decorrência da assimetria entre semiciclos. Ademais, verifica-se conteúdo harmônico de alta frequência advindo da intermitência, que é dada por descontinuidades da forma de onda da corrente. Consequentemente, nota-se que com o uso de técnicas de processamento de sinais que possibilitam a extração das frequências de sinais associados às FAIs, será possível caracterizá-las e oferecer subsídios para detectá-las.

Destaca-se que a análise das frequências do sinal deve ser realizada cautelosamente, pois, de acordo com Santos *et al.* (2017), outras fontes de transitórios eletromagnéticos podem ser

confundidas com aquelas induzidas pelas FAIs, como a Energização de Transformador (ET) e chaveamento de Ramal Lateral (RL), Carga Linear (CL), Carga Não Linear (CNL) e de Banco de Capacitor (BC). Portanto, para lidar com a possibilidade de ambiguidade, os autores consideram o tempo como uma parte importante no desenvolvimento de algoritmos de detecção de FAI, pois como esta não é detectada pela proteção convencional, o sistema permanece um maior tempo sob seus efeitos. Adicionalmente, é possível utilizar a energia dos sinais de tensão e corrente para que este tipo de falta não seja confundido com afundamentos e elevações de tensão e corrente, por exemplo.

Em vista disto, de acordo com Costa *et al.* (2015b), algumas etapas devem ser seguidas para que seja desenvolvida uma técnica eficiente aplicada à proteção de FAIs em sistemas elétricos. Num sistema sob falta, as técnicas se iniciam na obtenção de dados por meio de medições, com posterior extração de características. Assim, é possível que seja desenvolvido um modelo para simulação. Também, com estes dados, é viável realizar a detecção da falta, bem como a identificação da FAI perante outros eventos, evitando falsos positivos. Posteriormente, deve ser encontrada a localização da falta para auxiliar no desempenho das equipes técnicas responsáveis das distribuidoras de energia elétrica. Por fim, o sistema elétrico em questão pode retornar ao seu estado são.

Deste modo, são desenvolvidos diversos métodos para detecção deste tipo de falta, sempre empenhando-se em diferenciá-lo de outros eventos. Considera-se que a confiabilidade de relés desenvolvidos para detecção de FAIs apresentam importância muito maior do que a velocidade de operação, especialmente para redes de baixa corrente de falta à terra (BELKA; MICHALIK, 2004). Em síntese, espera-se uma decisão confiável sobre a existência de FAIs em sistemas elétricos. Tal consideração é importante e torna a particularização deste tipo de falta dentre outros fenômenos comuns tão relevante quanto sua detecção.

2.2 FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADAS À DETECÇÃO DE FAIs

Para caracterizar uma FAI é necessário transformar dados medidos em domínios de análise mais informativos, principalmente aqueles capazes de demonstrar, matematicamente, as características do tipo de falta. De acordo com Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017), os principais domínios de análise utilizados para a detecção de FAIs se enquadram em quatro classes:

- **Domínio de tempo:** Por exemplo, a amplitude e os valores RMS, de pico e médio do sinal;
- **Domínio da frequência:** Por exemplo, a TF do sinal;

- **Domínio da escala de tempo:** Por exemplo, a TW do sinal;
- **Domínio de tempo-frequência:** Por exemplo, a TS do sinal.

Adicionalmente, Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017) elucidam que índices de domínio de tempo simples, como amplitude e valor eficaz, de pico e médio, não demonstram eficientemente irregularidades na FAI. Embora as técnicas no domínio do tempo sejam geralmente simples, a suposição da janela de frequência infinita resulta na perda de informações neste domínio, ocasionando a diminuição da capacidade de extrair com precisão as peculiaridades intrínsecas da FAI.

Em vista do exposto, é preciso readequar e utilizar técnicas que consigam identificar as características dos sinais de FAI da melhor maneira possível. No decorrer deste capítulo serão descritas algumas das transformadas mais utilizadas para detecção de FAIs, evidenciando a melhor maneira de aplicá-las para este propósito.

2.2.1 Transformada de Fourier

Uma das principais características da FAI é a presença do arco elétrico. Este fenômeno implica em alterações no conteúdo harmônico da forma de onda dos sinais associados. De acordo com Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017), para ser obtido o conteúdo harmônico de sinais, é possível utilizar técnicas de domínio da frequência. A transformada que aborda este método e que será utilizada neste trabalho é a TF, visto que esta transformada provê informações das amplitude das diversas frequências do sinal.

Uma das informações obtidas dos sinais por meio da TF é a componente fundamental do sinal, que apresenta a frequência igual a do sistema elétrico (60 Hz no Brasil). Além deste, há o segundo grupo, dos componentes harmônicos, definidos como aqueles cujo valor de frequência é múltiplo inteiro da componente fundamental. O terceiro grupo, dos inter-harmônicos, são definidos por apresentarem frequências maiores que a fundamental, no entanto, não múltiplos inteiros. Já o quarto grupo, o dos componentes sub-harmônicos, são definidos na faixa de frequência entre zero e a ordem harmônica fundamental. Observa-se, ainda, o componente constante, também conhecido como valor CC do sinal, que é aquele de frequência igual a zero (MONTEIRO, 2014).

Partindo desta premissa, ao definir as componentes de resposta, é necessário saber quais são os cálculos para obtê-las. Primeiramente, será definida a TF de forma contínua, em que para um sinal $x(t)$, pode-se calcular a partir da Equação (2.1) (OLIVEIRA, 2007).

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Como todos os dados analisados neste trabalho são providos de sinais digitalizados, é necessário equacionar esta transformada de forma discreta. Isso é realizado a partir da Transformada

Discreta de Fourier (TDF), que transforma dados finitos no domínio do tempo para o da frequência (MONTEIRO *et al.*, 2014; OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999). A formulação do cálculo da TDF de um conjunto de N amostras do sinal está apresentada na Equação (2.2), que segue:

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{-j\pi nk/N}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.2)$$

sendo $n=0, 1, 2, \dots, N-1$, $X[n]$ o sinal no domínio da frequência e $x[k]$ no domínio do tempo.

Neste caso, como acontece em muitas aplicações, a TDF pode ser computada com um algoritmo de Transformada Rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform* (FFT), que é implementado para diminuir a complexidade temporal necessária em aplicações práticas. Assim, a FFT realiza as operações da TDF e, para os casos possíveis, armazena cálculos já realizados para operações futuras, diminuindo a quantidade de processamento necessário (OLIVEIRA, 2007).

A TDF produz uma sequência de valores complexos cujas amplitudes correspondem as componentes de frequência discreta. Como é inerente à Equação (2.2), a derivação da TDF exige estritamente que o sinal de entrada seja periódico. Para evitar erros devido ao efeito *aliasing*, a taxa de amostragem do sinal de tempo precisa ser pelo menos o dobro da frequência mais alta do sinal, isto é, estar em conformidade com o critério de *Nyquist* (KIM; AGGARWAL, 2000). Logo, ao calcular a TF de um sinal, são obtidas como respostas a amplitude e a fase de frequências fixas em todo o seu período.

A TF, quer seja em forma contínua ou discreta, apresenta grandes vantagens para algumas aplicações, pois determina todas as frequências presentes no sinal. Por outro lado, não há relação com o domínio temporal, apresentando uma análise apenas no domínio da frequência, o que confere uma desvantagem (OLIVEIRA, 2007). Isto acontece uma vez que, ao calcular a TF de uma forma de onda, é necessário considerar que esta é invariante no tempo, assim, o resultado obtido será a amplitude de cada frequência do sinal (LIMA *et al.*, 2016). A informação de frequência calculada pela TF é uma média durante todo o tempo de duração do sinal. Portanto, se houver um transitório local em algum pequeno intervalo de tempo, este contribuirá para a TF, no entanto, sua localização no eixo temporal será perdida (KIM; AGGARWAL, 2000).

Observa-se que embora as técnicas do domínio da frequência sejam capazes de abordar algumas propriedades, a incapacidade de localizar temporalmente os componentes de frequência diminui a eficiência de detecção. O motivo é que vários distúrbios na rede de distribuição, como o chaveamento de capacitores e a energização de transformadores, compartilham características de domínio de frequência semelhantes à FAI (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017).

Ao calcular a FFT em janelas específicas do sinal, poderão ser obtidos os valores em amplitude de todas as frequências durante todo o tempo de falta, de acordo com o deslizamento da janela do sinal em que a FFT será calculada. A ideia é introduzir um parâmetro de frequência

local, como se a TF observasse o sinal por meio de uma janela menor dentro deste. Assim, a parte do sinal que está no interior da janela em um instante de tempo, pode ser abordada como aproximadamente estacionária (OLIVEIRA, 2007). Deste modo, a FFT de um sinal janelado poderá ser calculada a partir da Equação (2.3).

$$X[k, m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]w[n-m]e^{\frac{-j\pi nk}{N}} \quad (2.3)$$

Além do exposto, existem outras transformadas derivadas da TF, como a Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC). Esta transformada é uma ferramenta tradicional para análise de frequência e tempo, principalmente devido à sua propriedade de capturar variações no sinal espectral adaptando a TF para analisar apenas uma pequena seção do sinal de cada vez. A TFTC é adequada para sinais não estacionários e provê informações sobre os domínios do tempo e frequência a cada amostra do sinal, não a cada janela, como a FFT. Além disso, possui uma implementação direta e é aplicável em dispositivos de proteção em tempo real, podendo identificar variações no espectro de frequência do sinal, portanto, não exigindo que o sinal seja estacionário como FFT. Assim, essa transformada oferece mais informações sobre o sinal, pois fornece a amplitude e o ângulo das frequências a cada amostra do sinal, ao invés de a cada janela, facilitando a identificação de transitórios. Evidencia-se que a TFTC requer compromisso com o formato da janela, cuja função deve ser escolhida com base em seus recursos no domínio da frequência, analisando seu lóbulo principal e lóbulos laterais. Alguns exemplos destas janelas são a Nuttall, Blackman-Harris, Gaussiana, Chebyshev, Kaiser e Blackman (LIMA *et al.*, 2018b). Não existe consenso na literatura sobre qual a janela seria mais adequada para a detecção de FAIs.

Destaca-se que em qualquer das transformadas derivadas da TF, poderá ser utilizada uma janela fixa e deslizante durante todo o sinal, sabendo que escolher seu tamanho requer compromisso entre tempo e frequência, uma vez que a resolução permanece constante ao decorrer do tempo. Isso acontece pois o tamanho da janela será diretamente proporcional à resolução em frequência, e inversamente proporcional ao tempo. Se esta janela for muito grande, será difícil identificar a variação da frequência no tempo, e, se for curta, a precisão da frequência é perdida e não será possível distinguir os componentes espectrais do sinal (LIMA *et al.*, 2016). A representação matemática da resolução em frequência está apontada na Equação (2.4), que segue:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2.4)$$

em que f_s é a frequência de amostragem e N o número de amostras.

A importância da análise da resolução da transformada se dá pela aplicação de IH na detecção de FAIs. Segundo Macedo *et al.* (2015), a origem dos componentes de frequência IH está associada com variações aleatórias do arco elétrico durante situações de falta. Nota-se que

quanto maior a amplitude da variação, maior a quantidade de IHS associados, situação que ocorre em grande parte das FAIs. Os autores ainda completam que, no caso de FAIs, o arco elétrico de comprimento variável sempre ocorre, seja na ruptura do condutor sob carga ou no ponto de contato com qualquer superfície ou objeto. Assim, equipamentos de proteção que possam identificar conteúdo IH em sinais associados à FAI, apresentariam uma abordagem promissora para detectá-la. Em síntese, para identificar as componentes IHS, é necessário que o tamanho da janela o sinal seja maior que um ciclo, para que possa ser ampliada a resolução em frequência e as IHS sejam obtidas.

Diante do exposto, com o objetivo de estabelecer o melhor tamanho da janela para a proposta de detecção de seu trabalho, Lima *et al.* (2018b) mostram que a resolução em frequência utilizada para analisar sinais de FAI deverá ser de, no máximo, 10 Hz, a fim de evitar o cruzamento entre as componentes de frequência. Tal preocupação se dá, pois de acordo com Monteiro (2014), quando o sinal monitorado contém conteúdo IH e é utilizada a FFT, pode ocorrer um fenômeno chamado espalhamento espectral, fazendo com que exista propagação da energia das componentes harmônicas pelo espectro das frequências próximas, sem que necessariamente a energia nestas frequências verdadeiramente existam no sinal.

Um exemplo da preocupação com o espalhamento espectral são as normas e padrões elaboradas com o propósito de reduzir este efeito em medidores de energia elétrica. Com este intuito, foram elaborados os requerimentos e práticas recomendadas pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), para o controle harmônico em sistemas de energia elétrica (IEEE Power and Energy Society, 2014), que provê um guia geral para medição de harmônicos e IHS até 9 kHz por um método de agrupamento. Para evitar espalhamento espectral, para medições de IH, o guia sugere o uso preferencial de uma janela retangular de 200 ms, isto é, 12 ciclos, para prover, assim, uma resolução em frequência, de acordo com a Equação (2.4), de 5 Hz.

2.2.2 Transformada Wavelet

A TW é uma transformada que mapeia os sinais do domínio do tempo para o domínio da escala de tempo. Deste modo, a informação de frequência e o instante (localização) no tempo em que estes componentes de frequência ocorrem são capturadas (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017).

As wavelets foram introduzidas em um estudo sobre as variações sismológicas a partir da constatação que a análise de Fourier não estava sendo eficiente durante as repentinas variações do sinal, e, a partir disso, se desenvolveram nos campos da matemática, engenharia e na física quântica. Desta maneira, puderam prover uma alternativa à FFT para solucionar o problema da resolução, dado que ambas realizam a multiplicação do sinal por uma função (OLIVEIRA, 2007).

A TW divide a banda de frequência do sinal em componentes de alta frequência, chamados de coeficientes de detalhes, e em componentes de baixa frequência, nomeados aproximações. Estes coeficientes são obtidos por filtros passa-baixa e passa-alta em cascata com amostras divididas por um fator de 2. Os coeficientes de ambos os filtros dependem da wavelet mãe selecionada (SANTOS *et al.*, 2017).

Na TW, os sinais originais, que podem ser de imagens, formas de onda de corrente ou de tensão, por exemplo, são representados em termos de wavelet escalados e transladados. Desta maneira, é permitido que as características do sinal sejam manipuladas em diferentes escalas de forma independente, e, a partir disso, originado o fortalecimento ou a supressão de algumas características particulares.

Em vista disto, a TW é calculada separadamente por segmentos diferentes do sinal no domínio do tempo. Para as frequências mais baixas do sinal, as wavelets são de menor frequência, já para as frequências mais altas, o sinal é analisado por uma wavelet de frequência maior. As amplitudes destas frequências são calculadas ao longo do tempo. A principal vantagem da TW é a capacidade de analisar sinais que contêm descontinuidades (ALI *et al.*, 2016). Além disso, esta transformada não apresenta apenas uma função-base como a TF, mas pode ter infinitas, as quais são conhecidas como wavelets mãe (OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Belka e Michalik (2004), as FAIs, normalmente, apresentam descontinuidades nas formas de ondas dos sinais nas proximidades da passagem dos valores das correntes por zero, porque há a extinção e re-ignição do arco elétrico, o que acarreta em variações de energia. Baseado nisso, é possível identificar estas alterações na energia do conteúdo de frequência que aparecem quando ocorre descontinuidade nos coeficientes obtidos por meio da TW. Isso pode ser realizado pois, de acordo com Kim e Aggarwal (2000), a TW é adequada tanto para sinais que contêm componentes senoidais, quanto de impulso.

Deste modo, pode-se calcular a TW $C(a, b)$ contínua de um sinal $x(t)$ pela Equação (2.5) com uma wavelet mãe $\psi(t)$ (NASON; SAWCZENKO, 2001; KIM; AGGARWAL, 2000).

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.5)$$

A wavelet mãe $\psi(t)$ pode ser definida genericamente de acordo com a Equação (2.6).

$$\psi(t) = g\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.6)$$

Em que a é a dilatação ou fator de escala, b é o fator de conversão e ambas as variáveis são contínuas.

A TW contínua é calculada realizando translações e escalonamentos contínuos de uma função sobre um sinal. Na prática, essa transformada não seria muito versátil, pois iria requerer

a realização de infinitas translações e escalonamentos, demandando muito tempo e recursos computacionais. Deste modo, a Transformada Wavelet Discreta (TWD) foi introduzida com o propósito de superar este obstáculo. A TWD não é transladada nem escalonada continuamente, mas sim em intervalos discretos, resultando em uma série de coeficientes wavelet, tornando-a digitalmente implementável (OLIVEIRA, 2007). A TWD pode ser calculada a partir da Equação (2.7):

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) g\left(\frac{k - n b_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2.7)$$

na qual $g(\cdot)$ é a *wavelet* mãe e os parâmetros de escala e translação a e b são funções de um parâmetro inteiro m (KIM; AGGARWAL, 2000).

Assim, ao calcular a TWD de um sinal, este será decomposto por dois filtros complementares, que são chamados de passa-baixa e passa-alta. Cada um desses filtros utiliza uma função de escala para decompor o sinal. O resultado da filtragem gerará dois sinais, chamados de componentes de baixa e alta frequência. O componente de baixa frequência, também conhecido como sinal de aproximação, é produzido quando o sinal original é decomposto usando o filtro passa-baixa. O componente de alta frequência é normalmente chamado de sinal de detalhe e é produzido quando o sinal original passa pelo filtro passa-alta (ALI *et al.*, 2016).

Consequentemente, estes detalhes e aproximações extraídos serão derivados de uma maneira hierárquica de multi-resolução com escalamento por um fator de dois, possibilitando a análise do sinal no domínio da frequência e do tempo (BELKA; MICHALIK, 2004). A Figura 2 ilustra a divisão do sinal em altas e baixas frequências por filtros passa-alta ($g(n)$) e passa-baixa ($h(n)$), como explicado anteriormente, em que a letra A representa os coeficientes de aproximação e a letra D, os coeficientes de detalhe. Os números posteriores às letras representam o nível da resolução decomposta.

Figura 2 – Divisão das resoluções da TW.

Fonte: Adaptada de Ali *et al.* (2012).

Como mencionando anteriormente, o resultado obtido da TW de um sinal está fortemente atrelado à escolha da wavelet mãe, sendo que existem muitas destas que podem ser empregadas na prática. Para escolher a melhor, os atributos de diferentes wavelets mãe precisam ser considerados.

Existem vários tipos, como por exemplo a Haar, Symmlet, Daubechies, Morlet, etc. Dessas wavelets mãe, a Haar e Morlet são classificados como ortogonais, enquanto a Symmlet e Daubechies são não-ortogonais.

Sabendo disto, nota-se que a TW engloba um conjunto infinito de wavelets devido à necessidade de análise multi-resolução. Por exemplo, diversas famílias de wavelets (também conhecida como wavelets filhas), podem ser geradas a partir de uma wavelet mãe variando a escala e os fatores de translação (KIM; AGGARWAL, 2000).

Um exemplo de família de wavelets muito utilizada é a criada por Ingrid Daubechies, que é descrita como dbN, em que N é a ordem da wavelet e db o sobrenome da autora. Quanto maior o valor de N, maior seu suporte compacto. A db1, por exemplo, tem o mesmo comportamento gráfico da Haar. Já para N maior que 1, as wavelets não têm nenhuma expressão explícita e nem simetria avaliada (FILHO, 2003). Sendo assim, baseado na pluralidade de wavelets mãe desenvolvidas, a escolha do uso de cada uma depende basicamente da adequação para cada aplicabilidade.

Embora muitos autores utilizem a TW para caracterização e detecção de FAI, Ghaderi, Ginn e Mohammadpour (2017) comentam que, apesar das vantagens das técnicas baseadas em TW, é um desafio projetar uma técnica de detecção sistemática baseada na mesma. Isto acontece devido ao suporte estreito de alta frequência, subjetividade à escolha da wavelet mãe e perda da resolução do recurso (baixa capacidade de interpretação) para alguns casos, pois a cada resolução, há uma divisão por dois no número de amostras no sinal. Por exemplo, se um sinal de 80 amostras por ciclo é decomposto pela TW, no primeiro nível de resolução haverá 40 amostras para o coeficiente de detalhe e 40 para o de aproximação. No próximo nível, haverá somente 20 amostras para os detalhes e 20 para a aproximação, e assim consequentemente.

Essa característica demonstra que é possível que exista perda de informações do sinal, o que é agravado em sinais com uma baixa frequência de amostragem. No entanto, a TW permanece como uma boa opção por apresentar a vantagem de usar janelas curtas para as altas frequências e janelas longas para baixas frequências, fornecendo, assim, boa informação do sinal (LAI; STYVAKTAKIS; SICHANIE, 1998). Identifica-se, porém, que existem modificações realizadas na transformada que diminuem problemas como este, como o caso da *Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform* (MODWT), que não apresenta problemas de subamostragem ao aumentar o nível das resoluções, e pode ser aplicada para a detecção de FAIs como demonstrado em Costa *et al.* (2015a).

2.2.3 Transformada de Stockwell

O uso da TS para a detecção de FAIs foi estabelecido a fim de manter a localização de tempo-frequência da TW e evitar algumas das suas deficiências, estabelecendo a análise do domínio de tempo-frequência.

A TS é apresentada como um método híbrido entre a TF e a TW (MANSINHA *et al.*, 1997). Uma das características que a fez ser utilizada é a apresentação de melhor acurácia quando o sinal obtido apresenta ruído, ao contrário da TW (ROUTRAY; MISHRA; ROUT, 2015). Assim sendo, a TS é introduzida como uma ferramenta de análise do domínio de tempo-frequência que estima a energia do sinal em cada ponto no tempo e nas coordenadas de frequência (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017).

Para visualizar como aplicar e deduzir a TS, existem duas maneiras: a primeira como um caso especial da TF, e a segunda como uma correção de fase da Transformada Wavelet Contínua (TWC). Por isso, a TS é nomeada como uma evolução de ambas.

Demonstrar que a TS é um caso especial da TF parte do pressuposto que é possível obter o espectro de frequência de um determinado sinal $x(t)$ em uma janela w entre o tempo t e τ por meio da TF, que está descrito na Equação (2.8). No entanto, como o sinal de FAI é variante no tempo e a TF considera o sinal como estacionário dentro de sua janela de largura fixa, ele não proporcionará respostas à variação deste sinal dentro da janela (MOUKADEM; ABDESLAM; DIETERLEN, 2014; SOUZA, 2015).

$$S_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau, f)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.8)$$

Por outro lado, a TS realiza um janelamento no sinal utilizando uma função janela Gaussiana ($w(t, f)$) normalizada, por ser mais compacta no tempo e na frequência, conforme apresentado na Equação (2.9).

$$w(t, f) = \frac{1}{\sigma(f)\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-t^2}{2\sigma(f)^2}} \quad (2.9)$$

Já o ponto que correlaciona a TW e a TS é pautado no fato que a janela da TS apresenta largura variável, pois o desvio padrão ($\sigma(f)$) da janela gaussiana é inversamente proporcional à frequência (f) do sinal, como expresso na Equação (2.10).

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|} \quad (2.10)$$

Deste modo, substituindo as Equações (2.10) e (2.9) em (2.8), é obtido o equacionamento da TS de modo contínuo na Equação (2.11).

$$S_x(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{\frac{-(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.11)$$

Em vista disto, a TS fornece uma matriz resultado das frequências em relação ao tempo. Assim, Stockwell, Mansinha e Lowe (1996) definiram que, para uma frequência específica fI , é obtido $S(\tau, fI)$, nos quais os autores denominaram de *voice*, em português, voz. Já se for

avaliado o resultado fixando tempo τ_1 específico do sinal, obtendo uma função $S(\tau_1, f)$, ela será denominada como espectro local, isto é, o espectro de frequências específico naquele instante de tempo.

A TS também é passível de dedução a partir da TW, pois a TS de um sinal $x(t)$ pode ser definida como uma TWC que utiliza uma wavelet mãe específica multiplicada por um fator de fase. No entanto, esta função não possui média zero, portanto não satisfaz à condição de admissibilidade definida para as *wavelets*. Isso faz com que a TS não seja um tipo de TW (STOCKWELL; MANSINHA; LOWE, 1996; SOUZA, 2015).

Assim como para as outras transformadas, é possível que seja realizado o cálculo da Transformada de Stockwell Discreta (TSD). A TSD pode ser deduzida a partir da TDF, que parte do princípio que se há um sinal $h(t)$ que é dado em sua forma discretizada por $h[kT]$, para k amostras em que $k=0, 1, \dots, N-1$, sendo N o número de amostras do sinal espaçadas em um intervalo T . A formulação da TDF para tal é apresentada na Equação (2.12), como segue (STOCKWELL; MANSINHA; LOWE, 1996):

$$H \left[\frac{n}{NT} \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (2.12)$$

em que n representa as ordens harmônicas do sinal, variando como $n=0, 1, \dots, N-1$.

Já para a TSD, a TS é a projeção do vetor definido pela série temporal $h[kT]$ em um conjunto de vetores abrangentes. Estes vetores de abrangência não são ortogonais e os elementos da TS não são independentes. Cada vetor de base (da TSD) é dividido em N vetores. Assim, é realizado o produto de cada elemento do vetor base por cada vetor N de deslocamento da Gaussiana, de tal modo que a soma destes vetores é o vetor base original (STOCKWELL; MANSINHA; LOWE, 1996). Ademais, após efetuados todos os cálculos e deduções, a TSD é apresentada de acordo com a Equação (2.13), assim:

$$S \left[jT, \frac{n}{NT} \right] = \sum_{m=0}^{N-1} H \left[\frac{m+n}{NT} \right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{-\frac{i2\pi mj}{N}} \quad n \neq 0 \quad (2.13)$$

em que j, m e $n=0, 1, \dots, N-1$ e a transformada é calculada para cada ordem harmônica n diferente de zero, uma vez que para $n=0$, haverá como resultado a constante definida na Equação (2.14). Isto é realizado para que seja assegurada que a transformada inversa seja exata para qualquer sinal (STOCKWELL; MANSINHA; LOWE, 1996).

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h \left(\frac{m}{NT} \right) \quad (2.14)$$

Portanto, a TS fornecerá uma matriz complexa S como resultado, em que as linhas contêm as componentes em frequência e as colunas representam o espectro local, isto é, os valores de todas as frequências para cada tempo específico. As frequências obtidas como resposta

são normalizadas com relação à máxima frequência permitida de acordo com o critério de Nyquist (SOUZA, 2015). Logo, define-se que a quantidade de frequências do sinal dependerá da frequência de amostragem do sinal analisado.

Salienta-se que a TS não só provê informação de fase, bem como também mantém uma resolução adequada em ambos os domínios do tempo e da frequência (LIMA; BRITO; SOUZA, 2019). Ademais, a partir da matriz de resultados, é possível extrair informações importantes sobre o sinal, como harmônicos específicos e parâmetros estatísticos.

2.3 ESTADO DA ARTE SOBRE DETECÇÃO DE FAIs

De acordo com Depew *et al.* (2006), concessionárias de energia elétrica consideram um sucesso se um sistema de detecção de FAIs atender aos seguintes itens:

- Operar somente quando a FAI está realmente presente, que implica em não operar para nenhum outro evento;
- Deve haver um compromisso entre a sensibilidade da detecção e a segurança contra alarmes falsos.

A primeira parte da proposição de detecção de FAIs é pautada na escolha de grandeza elétrica que será utilizada para que suas características sejam extraídas por meio de alguma técnica, como as que serão mencionadas na próxima seção. A maioria das técnicas utiliza o sinal de corrente, no entanto também existem aplicações para os sinais de tensão (GAUTAM; BRAHMA, 2013), tensão e corrente (LAI *et al.*, 2005) e do campo magnético (BAHADOR; NAMDARI; MATINFAR, 2018). Ao aplicar a corrente, os transformadores de corrente nos SDs de média tensão podem operar como filtros passa-baixa, o que pode resultar na perda de parte da informação do sinal. Já o uso de tensão só é eficiente quando há queda de tensão suficiente do local da falta até o ponto de medição. Como a amplitude da corrente de FAI é razoavelmente baixa, a queda de tensão geralmente não é suficiente para sensibilizar o sistema de proteção (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017). Por outro lado, técnicas alternativas, como a medição do campo magnético podem conferir maiores dificuldades, pois normalmente SDs de média tensão contam com medidores de tensão e corrente, o que facilitaria a obtenção de dados por essas grandezas.

Compreendendo a escolha da grandeza elétrica, é preciso avaliar detalhadamente as técnicas que podem ser utilizadas para extrair informações desses sinais e, assim, serem utilizadas como base para a detecção de FAIs. Isto posto, nas próximas subseções serão descritos alguns métodos de detecção de FAIs baseados na TF, TS e TW, além de serem abordados, resumidamente, métodos pautados em outras técnicas. Deve-se destacar que o intuito é de unicamente apresentar as métricas extraídas dos sinais de FAI por meio destas transformadas, para que este evento possa ser caracterizado, e não de comparar as técnicas de processamento.

2.3.1 Técnicas de Detecção de FAIs baseadas na Transformada de Fourier

Existem diversos algoritmos propostos na literatura cujas métricas de detecção de FAIs são baseadas na TF e em suas derivações, quer seja para aplicações relacionadas à extração de dados focando nas ordens harmônicas de baixa e alta frequência, ou até mesmo no conteúdo IH. Destaca-se que, nos últimos anos, estas técnicas puderam ser incrementadas devido à melhora na qualidade da amostragem de sinais por equipamentos de medição.

Diversos parâmetros podem ser utilizados para configurar a TF e suas derivações com o objetivo de fornecer resultados do conteúdo em frequência de sinais. Um exemplo é a análise realizada no trabalho de Lima *et al.* (2016), em que foi proposto um estudo detalhado sobre qual a melhor janela para se aplicar a FFT para a detecção de FAIs por meio do comportamento da 3ª ordem harmônica, pois, segundo os autores, a modificação do valor desta harmônica está fortemente atrelada à existência de FAIs. Neste trabalho, após realizados os testes e obtidos os resultados, a configuração da janela e o algoritmo de detecção foram avaliados em um SDMT, por meio da aplicação de FAIs simuladas a partir de um modelo com resistências variáveis. Com o intuito de não perder informações do sinal e diminuir o espalhamento espectral, os autores concluíram que o melhor uso desta transformada para esta aplicação é pautada na escolha da janela com tamanho de cinco ciclos com o formato de *Blackman-Harris*, que percorre o sinal a cada 0,8 ciclo.

Outro trabalho que contribui na detecção de FAIs com técnica baseada na TF é o de Gomes, Ozansoy e Ulhaq (2017), que identifica FAIs em vegetação utilizando a TDF e o espectro de densidade de potência em um sistema de média tensão real. Os autores definem que os sinais registrados durante a ocorrência deste tipo de falta apresentam uma forte presença de amplitude nas frequências de 50 a 400 kHz. Deve-se salientar que, neste caso, são necessários equipamentos com alta taxa de amostragem para estas frequências serem avaliadas, e isso dependerá do investimento das empresas que desenvolvem sistemas de proteção e na evolução da tecnologia de aquisição de dados.

Dentre os trabalhos que detectam as FAIs por meio de contato com o solo, destacam-se os de Soheili *et al.* (2016) e Soheili, Sadeh e Bakhshi (2018), que são pautados na extração de componentes harmônicos dos sinais por meio de um algoritmo de FFT. No trabalho de Soheili *et al.* (2016) é utilizada a corrente da fase sob falta como grandeza elétrica, e a partir dela são extraídas as amplitudes da 2ª, 3ª, 4ª e 6ª ordens harmônicas. Neste trabalho não são consideradas cargas não lineares no sistema. Assim, em Soheili, Sadeh e Bakhshi (2018), é proposta uma resolução deste problema incrementando o método apresentado em Soheili *et al.* (2016). Nesta nova proposta, quando há perturbação de cargas não lineares no sistema, a detecção de FAI é realizada pela métrica dada pela razão entre a amplitude da 7ª e 3ª ordens harmônicas e também entre a 5ª e 3ª ordens harmônicas do sinal resultante entre a soma das correntes das três fases. Os autores elencam que, quando não há perturbação, somente o método proposto em Soheili *et al.*

(2016) é suficiente para a detecção de FAIs em relação ao estudo e testes apresentados. Deve-se salientar que as técnicas baseadas em FFT podem não ser as melhores para detecção de FAIs, uma vez que os sinais de FAI variam de forma rápida ao longo do tempo e, como esta é uma transformada no domínio da frequência, pode haver perdas de informação dos sinais, inibindo a ampla aplicação desta técnica.

Ainda, existe a aplicação para a detecção de FAIs de outra transformada derivada da TF, a TFTC. Um exemplo disso é o trabalho de Lima *et al.* (2018b), que mostra a detecção de FAI usando a TFTC do sinal de corrente. Nesse caso, o algoritmo se baseou na existência e crescimento da 2^a, 3^a e 5^a ordens harmônicas ou na mudança no ângulo da 3^a ordem harmônica. Uma ideia interessante utilizada neste trabalho é o emprego de uma janela com tamanho de 5 ciclos, pois, segundo os autores, o atraso na detecção é fundamental para distinguir entre outros eventos transitórios de menor duração que acontecem no sistema. Constata-se que a principal dificuldade na aplicação da TFTC na detecção de FAIs é sua dependência com o tipo de janela utilizada.

Mesmo com todos estes trabalhos indicando o bom uso das transformadas derivadas da TF para a detecção de FAIs, deve-se atentar quanto a aplicações pautadas no comportamento dos componentes IH, uma vez que é necessário observar se estes são verdadeiros e não espalhamento espectral. Um exemplo disso é o trabalho de Macedo *et al.* (2015), cuja metodologia propõe a detecção de FAIs com as frequências IH em torno da fundamental (60 Hz). Na primeira tentativa de detecção a partir deste método, os autores utilizaram a TDF com uma janela de 60 ciclos, provendo uma resolução em frequência de 1 Hz. No entanto, foram encontrados problemas na aplicação devido ao espalhamento espectral, que é intrínseco da TDF, o que implicou em complicações à detecção. Mesmo com testes aplicando diversos tipos de janelas de ponderação, nenhuma ofereceu bons resultados, especialmente para os IHS de baixa amplitude. Deste modo, para detectar as FAIs, os autores optaram pelo uso de filtros digitais na faixa de frequência de interesse.

Visando as técnicas apresentadas baseadas na TF e em filtro, o Quadro 1 mostra o método utilizado para extração de características de sinais de FAI por técnicas selecionadas na bibliografia. Ademais, são apontadas as grandezas elétricas utilizadas nos métodos mencionados. As características apresentadas no Quadro 1 representam que, ao extrair estas informações das grandezas elétricas relacionadas, pode-se caracterizar a FAI e obter uma assinatura de seu comportamento.

2.3.2 Técnicas de Detecção de FAIs baseadas na Transformada Wavelet

Diversos trabalhos utilizam a TW e suas variações como técnicas de análise de sinais para detectar FAIs. No entanto, as relações dos parâmetros utilizados, a wavelet mãe escolhida e

Quadro 1 – Parâmetros e métricas utilizados em métodos de detecção de FAIs baseados na TF e em filtros.

Proposição	Método	Característica	Grandeza
(MACEDO <i>et al.</i> , 2015)	Filtro	IHs* de 48 a 56 Hz e de 67 a 80 Hz	Corrente de 1 fase
(LIMA <i>et al.</i> , 2018b)	TFTC*	Amplitude e fase da 3ª OH* Amplitude e fase da 2ª e 5ª OHs*	Corrente de 1 fase
(SOHEILI <i>et al.</i> , 2016)	FFT*	Amplitude da 2ª, 3ª, 4ª e 6ª OHs*	Corrente de 1 fase
(SOHEILI;SADEH; BAKHSHI,2018)	FFT*	Razão entre a amplitude da 7ª e 3ª OHs* Razão entre a amplitude da 5ª e 3ª OHs*	Soma das correntes de fase

Notas:

*FFT: *Fast Fourier Transform*

*TFTC: Transformada de Fourier de Tempo Curto

*IHs: Interharmônicos

*OH: Ordem Harmônica

Fonte: Elaborado pela autora.

os níveis de filtragem variam a cada um deles.

Em vista disto, o trabalho de Lai, Styvaktakis e Sichanie (1998), publicado há mais de 20 anos, propõe uma das primeiras aplicações da TW para detectar FAIs. Apesar de ser utilizado em linhas de transmissão e modelar a FAI somente como uma resistência de até 500 Ω , este método se torna importante pela escolha da wavelet mãe e critério de detecção. Na proposta foram utilizadas as formas de onda de tensão e corrente para o cálculo da transformada. O critério de detecção foi baseado no quinto nível de decomposição da TW calculada pela wavelet mãe da família Daubechies, a db4. Neste caso, falsos positivos não foram testados.

No âmbito de SDs de média tensão, destacam-se os trabalhos baseados na DWT. Em Sedighi *et al.* (2005) o método é fundamentado na aplicação da DWT por meio da wavelet mãe rbio3.1 nas frequências de 2 a 10 kHz presentes nos sinais de corrente. Já em Lai *et al.* (2005), a técnica é pautada no cálculo da DWT por meio de wavelet mãe db4 (da família Daubechies), em que tanto os sinais de tensão quanto os de corrente são utilizados para a detecção, sendo que se estabelece que para a corrente a assinatura de FAIs se encontra até 600 Hz, e já para a tensão, até 300 Hz. Ainda, na proposição de Gomes, Ozansoy e Ulhaq (2018), nota-se o uso da wavelet mãe da família das Symlets, a sym4, para o cálculo de parâmetros estatísticos dos sinais da corrente, sendo que o trabalho de Sekar, Mohanty e Sahoo (2018) faz o mesmo, mas utilizando a wavelet mãe db4. Ademais, tem-se o trabalho de Bahador, Namdari e Matinfar (2018), que inova ao utilizar como parâmetro o campo magnético, partindo do princípio que cada evento no sistema apresenta uma densidade de Kernel que pode ser extraído pela DWT utilizando a wavelet mãe db10.

É necessário destacar que técnicas baseadas na DWT podem apresentar problemas caso haja subamostragem, principalmente em relação a métodos que necessitam de diversos níveis de resolução para a extração das características. Com o objetivo de melhorar a técnica, é apresentado o trabalho de Costa *et al.* (2015a), que com o ensejo de realizar a detecção de FAIs em tempo

Quadro 2 – Parâmetros e métricas utilizados nos métodos propostos baseados na TW.

Proposição	Transformada	Wavelet/ mãe	Métrica/ Faixa de frequência	Parâmetro*
(SEDIGHI <i>et al.</i> , 2005)	DWT*	rbio3.1	2-10 kHz	Corrente
(LAI <i>et al.</i> , 2005)	DWT*	db4	<600 Hz-corrente <300 Hz-tensão	Tensão e Corrente
(GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2018)	DWT*	sym4	Parâmetros Estatísticos	Corrente
(BAHADOR; NAMDARI; MATINFAR, 2018)	DWT*	db10	Densidade de Kernel	Campo Magnético
(SEKAR; MOHANTY; SAHOO, 2018)	DWT*	db4	Parâmetros Estatísticos	Corrente
(COSTA <i>et al.</i> , 2015a)	MODWT*	db4 e db90	Margem de Energia	Corrente

Notas:

* DWT: *Discrete Wavelet Transform*

*MODWT: *Maximal Overlap DWT*.

*Parâmetro: Os parâmetros indicados neste quadro se referem à grandeza elétrica especificada da fase do sistema sob falta.

Fonte: Elaborado pela autora.

real, aplica uma modificação mais recente da TWD, a MODWT para a obtenção da margem de energia dos sinais de corrente aplicando as wavelets db4 e db90 para a detecção de FAIs. Segundo os autores, a MODWT conta com diversas vantagens em relação à TWD, como por exemplo, não depender da escolha da wavelet mãe.

Além desses, existem outros trabalhos na literatura que aplicam a TW para detecção de FAIs, como Lazkano *et al.* (2001), Belka e Michalik (2004), Yang, Gu e Jeng (2004), Abohagar e Mustafa (2012), que podem ser considerados precursores para a detecção de FAIs com o uso da TW, mas apresentam diversas necessidades de contribuições, pois utilizam modelos simples para detectar as FAIs, além de realizarem um número reduzido de testes quando comparados aos métodos supracitados.

É importante salientar que, ao observar os trabalhos mencionados, constata-se que não há consenso sobre o uso da wavelet mãe que melhor consiga extrair as características das FAIs, bem como na escolha da faixa de frequência que apresentaria melhor a assinatura da FAI, além do nível de resolução da TW que a melhor caracterizaria. Um resumo das principais técnicas baseadas na TW é elencado no Quadro 2.

2.3.3 Técnicas de Detecção de FAIs baseadas na Transformada de Stockwell

Na literatura recente são encontrados alguns métodos de detecção de FAIs cujas métricas são extraídas por meio da TS. Em vista disso, esta subseção apresenta um breve resumo das

métricas extraídas de sinais a partir desta transformada.

Uma abordagem do uso da TS para resolução de problemas em sistemas elétricos de potência, apesar de não aplicá-la diretamente para FAIs, está descrito em Biswal e Dashb (2013). Neste trabalho é proposto o uso da TSD para classificação de eventos de qualidade da energia elétrica a partir da extração de diversos parâmetros. Uma das principais ideias que podem ser absorvidas deste trabalho é que, utilizando um filtro passa-banda, o custo computacional desta transformada pode ser diminuído, pois a TSD é calculada somente para as frequências que são objetivo no sinal.

Em 2008, exclusivamente para detecção de FAIs, foi publicado o estudo de Samantaray, Panigrahi e Dash (2008). Nele, os parâmetros são extraídos de modo híbrido da TS e uma transformada de tempo - tempo (TT- *transform*) da corrente. As métricas utilizadas para detecção são a energia e o desvio padrão da matriz de resposta da TS dos sinais de corrente, tanto no domínio do tempo quando da frequência.

Já o trabalho de Kar e Samantaray (2014) apresentou a detecção de FAIs em uma microrrede em modo ilhado e conectado à rede. O método é embasado na energia diferencial calculada pela TS, cujo método de decisão é baseado na técnica de reconhecimento de padrões, e é fundamentado na energia diferencial da matriz de resposta da TS dos sinais de corrente das fases. No trabalho de Routray, Mishra e Rout (2015) também é utilizada a matriz da TS obtida dos sinais de corrente, mas são calculados parâmetros estatísticos para tal.

Nota-se ainda o trabalho de Lima *et al.* (2018a), em que é utilizada somente a TS para identificação e método de decisão da detecção da FAIs. A técnica proposta é baseada em parâmetros estatísticos obtidos pela TS dos sinais de corrente do sistema, como a energia, os valores máximos, entropia, máxima diferença de energia, e o desvio padrão. Além desse, recentemente, foi publicado o trabalho de Lima, Brito e Souza (2019). Neste artigo é proposto um método que utiliza somente o ângulo da 3ª harmônica do sinal extraído pela TS, o que implica em maior facilidade para implementação.

Ao analisar esses trabalhos sobre a detecção de FAI com o uso da TS, percebe-se a constante evolução ao longo dos anos. Constata-se que não há consenso no estudo sobre qual faixa de frequência (ou harmônica) extraída por esta transformada seria a melhor métrica para detecção de FAIs, havendo possibilidade de diversas contribuições de estudos neste sentido. Ademais, ao empregar técnicas baseadas em harmônicos específicos, como no caso de alguns destes trabalhos da TS e também os baseados na TF, deve-se atentar para a possibilidade de haver implicações no funcionamento das técnicas caso tais harmônicos pré-existam em regime permanente, o que não é abordado por nenhum destes trabalhos. O Quadro 3 apresenta a síntese das métricas e grandezas elétricas das proposições baseadas na TS aqui destacadas.

Quadro 3 – Parâmetros e métricas utilizados nos métodos de detecção de FAIs da literatura baseados na TS.

Proposição	Métricas	Grandeza Elétrica
(SAMANTARAY; PANIGRAHI; DASH, 2008)	Energia e desvio padrão no domínio do tempo e frequência	Corrente de 1 fase
(ROUTRAY; MISHRA; ROUT, 2015)	Parâmetros estatísticos da matriz da TS	Corrente de 1 fase
(KAR; SAMANTARAY, 2014)	Energia diferencial da matriz da TS	Corrente de 1 fase
(LIMA <i>et al.</i> , 2018a)	Parâmetros estatísticos da matriz da TS	Corrente de 1 fase
(LIMA; BRITO; SOUZA, 2019)	Desvio padrão da 3ª ordem harmônica	Corrente de 1 fase

Fonte: Elaborado pela autora.

2.3.4 Outros Métodos de Detecção de FAIs

Além dos métodos baseados na TF, TW e TS, a bibliografia acerca da detecção de FAIs apresenta outros métodos. Existem algumas patentes já criadas que são empregadas na detecção de FAIs, apesar de não apresentarem 100% de acurácia. A patente descrita em Zuercher e Tennies (1996), por exemplo, apresenta um método de discriminação entre arcos potencialmente danificadores, eventos em que não há arco e aqueles de chaveamentos de curta duração. O dispositivo não responde a todos os arcos, porém provê o indicativo de que determinado evento é potencialmente um. Outra técnica patenteada que visa a detecção de faltas com arco, e, consequentemente, a FAI, é o de Russell e Aucoin (1996), em que os inventores usam um método de detecção de faltas baseado na energia da corrente do sistema. A abordagem consiste em fornecer vários valores limiares de energia que representam diversas condições no sistema, sendo estes eventos com valores de energia considerados normais, maiores e menores. Logo, o algoritmo determina, baseado no número de valores acima dos limiares, quais situações representam a existência de uma falta com arco no sistema.

Por fim, no dispositivo patenteado por Russell, Aucoin e Benner (1996), a corrente de carga é monitorada e analisada para obter um valor de energia. Este valor é comparado a um valor limite armazenado em um *buffer*. O método de detecção é baseado nos valores de energia, que são comparados com limites superiores, inferiores e também na diferença entre dois valores subsequentes. Baseado nisso, um sinal de falha é emitido se todos estes padrões de variação da energia dos sinais acontecerem.

Para redes inteligentes, existem outras técnicas que podem auxiliar em métodos de detecção de FAIs, como o uso da tecnologia *Power Line Communication* (PLC). Eles podem ser aplicados para a detecção e localização de FAIs, como realizado nos trabalhos de Milioudis, Andreou e Labridis (2012), Milioudis, Andreou e Labridis (2015) e Wang, Geng e Dong (2018), que mostram aplicações na proteção por relés, localização de fontes harmônicas e

falha antecipada de alarmes em redes inteligentes.

Além da TF, TS e TW, existe outra transformada com uma vasta gama de trabalhos que apresentam propostas de detecção de FAIs, a Morfologia Matemática. Dos trabalhos que se destacam, notam-se Gautam e Brahma (2013), Sekar e Mohanty (2018), Mishra, Panigrahi e Rout (2019) e Kavi, Mishra e Vilathgamuwa (2018). Apesar de grandes contribuições alcançadas com o uso desta transformada, ela necessita da escolha de diversos parâmetros de seu elemento estruturante, e a comunidade científica da área ainda não apresentou consenso sobre quais seriam as melhores escolhas para aplicação na detecção de FAIs.

2.3.5 Análise dos Testes Realizados em Trabalhos de Detecção de FAIs

Nas subseções anteriores foram apresentadas as métricas utilizadas, as grandezas e as particularidades de cada transformada de trabalhos propostos na literatura baseados na TF, TS e TW. Nesta subseção será realizada uma avaliação destas mesmas propostas, com uma visão crítica sobre os testes, aplicações e simulações realizadas. O intuito é produzir uma revisão dessas técnicas, pois cada proposição apresenta uma gama de particularidades. Toda esta análise está resumida, para cada transformada, nos Quadros 4, 5 e 6. São apresentados como o limiar ou método de decisão em cada trabalho é obtido, se os autores realizaram testes das técnicas com ruídos e quais foram os níveis de Relação Sinal-Ruído (RSR) testados, além de apresentar com quais outros eventos do sistemas elétrico foram realizadas as verificações de robustez dos métodos e, por fim, é apontado o meio de obtenção do sinal de FAI.

Quadro 4 – Características de testes realizados em métodos de detecção de FAIs baseados na TF e em filtros.

Proposição	Método de decisão ou limiar	Testes com ruído	Testes com outros eventos	Sinal de FAI
(MACEDO <i>et al.</i> , 2015)	Auto-adaptativo	Medições reais	MS*	Real
(LIMA <i>et al.</i> , 2018b)	Ajustável	não	BC*, RL*	Modelo e Real
(SOHEILI <i>et al.</i> , 2016)	Ajustável	não	BC*, PM*	Modelo
(SOHEILI;SADEH; BAKHSHI,2018)	Ajustável	30 dB	BC*, CNL*, <i>Spikes, DC offset</i>	Modelo

Notas:

*MS:Máquina de solda

*BC:Banco de Capacitores

*RL:Ramais Laterais

*CNL:Carga Não Linear

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar os métodos de decisão dos trabalhos de detecção de FAI, nota-se que a maioria aplica técnicas de decisão cujo treinamento é requerido, como técnicas de aprendizagem de máquina. Pode-se constatar a utilização deste tipo de método de decisão nos trabalhos

Quadro 5 – Características dos testes realizados em proposições de detecção de FAIs baseadas na TW.

Proposição	Método de decisão ou limiar	Testes com ruído	Testes com outros eventos	Sinal de FAI
(SEDIGHI <i>et al.</i> , 2005)	<i>Bayer Classifier</i>	não	FBI*,BC*,ET*,RL*,CFI*	Real
(LAI <i>et al.</i> , 2005)	<i>Nearest Neighbor Rule</i>	não	FBI*	Modelo
(COSTA <i>et al.</i> , 2015a)	<i>Boosted Decision Tree</i>	33 dB	BC*, FBI*, ET*	Real
(GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2018)	Densidade espectral de potência	Medições Reais	Medições Reais	Real
(BAHADOR; NAMDARI; MATINFAR, 2018)	Parâmetros estatísticos	não	BC*,CL*,ET*	Modelo
(SEKAR; MOHANTY; SAHOO, 2018)	Parâmetros estatísticos	10, 20 30 dB	BC*,CNL*,CL*	Modelo

Notas:

*BC:Banco de Capacitor.

*FBI:Falta de Baixa Impedância

*ET:Energização de Transformador

*RL:Ramal Lateral

*CFI: Corrente de Fuga de Isolador

*CL:Carga Linear

*CNL: Carga Não Linear.

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 6 – Características de testes realizados em métodos de detecção de FAIs baseados na TS.

Proposição	Método de decisão ou limiar	Testes com ruído	Testes com eventos	Sinal de FAI
(SAMANTARAY; PANIGRAHI; DASH, 2008)	Redes Neurais Artificiais	não	não	Modelo
(ROUTRAY; MISHRA; ROUT, 2015)	Redes Neurais Artificiais	30, 40 e 50 dB	BC*,CL*, FBI*	Modelo
(KAR; SAMANTARAY, 2014)	Reconhecimento de Padrões	não	FBI*	Modelo
(LIMA <i>et al.</i> , 2018a)	Ajustável	não	BC*,RL*, FBI*	Modelo e Real
(LIMA; BRITO; SOUZA, 2019)	Auto-Adaptativo	30 dB	BC*,RL*, FBI*	Modelo

Notas:

*BC: Banco de Capacitores

*CL:Carga Linear

*FBI:Falta de Baixa Impedância

*RL:Ramais Laterais

Fonte: Elaborado pela autora.

elencados no Quadro 5, que dizem respeito à TW, como em Sedighi *et al.* (2005), Lai *et al.* (2005), Gomes, Ozansoy e Ulhaq (2018) e Sekar, Mohanty e Sahoo (2018), e nos trabalhos

de Samantaray, Panigrahi e Dash (2008), Routray, Mishra e Rout (2015) e Kar e Samantaray (2014), que estão descritos no Quadro 6 e estão relacionados à métricas extraídas pela TS. No entanto, como os SDs de média tensão reais sofrem alterações topológicas e de carregamento ao longo do tempo, estas técnicas implicam em dificuldades de aplicações reais. Para contornar isso, existem métodos baseados em características extraídas diretamente das transformadas. Eles podem ser divididos entre aqueles que aplicam limiares ajustáveis previamente (LIMA *et al.*, 2018b; SOHEILI *et al.*, 2016; SOHEILI; SADEH; BAKHSHI, 2018; BAHADOR; NAMDARI; MATINFAR, 2018; LIMA *et al.*, 2018a), e aqueles com limiar adaptativo, que são mais fáceis de implementar nos mais diversos tipos de sistemas com as variadas curvas de carga que estes apresentam ao longo do tempo, como nos trabalhos de Macedo *et al.* (2015), descrito no Quadro 4, e no de Lima, Brito e Souza (2019), apresentado no Quadro 6.

Outra questão importante para discussão é a inserção de ruídos nos sinais, uma vez que sinais registrados em sistemas elétricos normalmente apresentam ruído branco gaussiano (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010). Este ruído tem uma RSR que normalmente varia entre 48 e 70 dB (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010; TOMIC; KUSLJEVIC; VUJICIC, 2007). Os ruídos implicam variações nas frequências de sinal, portanto, analisar os algoritmos em condições ruidosas torna-se essencial para técnicas com aplicações reais. Em relação aos trabalhos baseados na TF, somente no trabalho de Soheili, Sadeh e Bakhshi (2018) são aplicados ruídos nos sinais, como mostra o Quadro 4. Em relação a proposições baseadas na TW, expostas no Quadro 5, destacam-se os testes realizados em Costa *et al.* (2015a) e em Sekar, Mohanty e Sahoo (2018). Por fim, dentre os trabalhos baseados na TS e expostos no Quadro 6, somente os de Routray, Mishra e Rout (2015) e Lima, Brito e Souza (2019) realizam as avaliações da aplicabilidade de suas técnicas adicionando ruído aos sinais.

Destaca-se também que as FAIs implicam em características específicas para as frequências dos sinais associados, como abordado anteriormente. As transformadas extraem estas características e fornecem as métricas para os métodos de identificação. Frequentemente, outros distúrbios comuns em sistemas elétricos também podem modificar o conteúdo da frequência dos sinais. Portanto, os algoritmos de detecção de FAIs devem ser imunes a estes eventos, detectando apenas FAIs. Para aumentar a robustez dos métodos, alguns deles realizam análises de falsos positivos investigando a influência de faltas de baixa impedância e chaveamento de cargas lineares, banco de capacitores e de ramais do sistema (LAI *et al.*, 2005; ROUSTRAY; MISHRA; ROUT, 2015; KAR; SAMANTARAY, 2014). Os testes mencionados são necessários, mas podem não ser suficientes, pois os fenômenos que implicam variações harmônicas ao longo do tempo podem ser mais suscetíveis à confusão com as FAIs. Portanto, existe a necessidade de testar os algoritmos com condições que causam variação de frequência de corrente e/ou tensão ao longo do tempo. Neste sentido, eventos como a energização de um transformador, a partida de um motor e o chaveamento de uma carga não-linear são necessários. A energização do transformador é considerada nos trabalhos de Sedighi *et al.* (2005), Costa *et al.* (2015a), Sekar, Mohanty e Sahoo (2018), a partida de um motor em Soheili *et al.* (2016), e o chaveamento de

alguns tipo de cargas não-lineares em Soheili, Sadeh e Bakhshi (2018), Sekar, Mohanty e Sahoo (2018) e Sarlak e Shahrtash (2011). Adiciona-se que existem trabalhos que realizam testes com cargas mais específicas, como a Corrente de Fuga de Isoladores (CFI) (SARLAK; SHAHRTASH, 2011; SEDIGHI *et al.*, 2005), Máquina de Solda (MS) (MACEDO *et al.*, 2015) e *DC Offset* (SOHEILI; SADEH; BAKHSHI, 2018). Tais considerações são necessárias para proposições visando aplicações reais. Embora algumas delas possam ser específicas, se um conjunto mínimo de condições realistas, como a energização de transformador, motor ou carga não-linear não for analisado, o desempenho de qualquer método proposto de detecção de FAIs pode ser considerado muito otimista em relação a sua aplicabilidade.

Outra preocupação sobre o desempenho dos métodos de detecção de FAIs é a qualidade dos dados de entrada. Alguns trabalhos usam dados reais de experimentos de campo, mas devido à dificuldade de obtê-los, os modelos de simulação de FAIs são amplamente empregados. Existem diversos modelos de FAI já apresentados na literatura, como os propostos em Emanuel *et al.* (1990), Wai e Yibin (1998), Yang, Gu e Jeng (2004) e Nakagomi (2006). Nestes casos, mesmo que alguns modelos atendam a diversas características de variação e aleatoriedade do arco, nenhum representa todas as particularidades dos sinais de maneira tão próxima das características de FAI encontradas na literatura, principalmente quando se aborda a intermitência e a aleatoriedade com que estes efeitos ocorrem na prática. Quando não há aleatoriedade no modelo, os resultados do método podem ser inconclusivos para aplicações reais. No entanto, recentemente, foram propostos novos modelos, como o de Santos *et al.* (2013), que é baseado nas características da curva de corrente e tensão de sinais reais registrados em campo, e também o modelo proposto no trabalho de Trondoli (2017), em que as características dos sinais de FAIs são replicadas de maneira aleatória, gerando sinais de FAIs muito próximos aos reais.

Além destas questões, constata-se também que os testes das técnicas mencionadas foram realizados em sistemas específicos e com condições operacionais singulares. As técnicas de detecção de FAIs devem ser capazes de identificar a FAI em qualquer sistema, independentemente do local da falta. Como cada método foi aplicado em situações distintas e considerando localizações específicas das FAIs, é dificultada a realização de uma avaliação abrangente e uma comparação justa entre elas. Uma proposta em relação a isso está apresentada no Capítulo 4.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Apesar da grande variedade de técnicas de detecção de FAI, este tema continua um desafio para o estudo dos SDs de média tensão, dado que são vastas as classificações e meios matemáticos para obtenção de dados.

Uma vez destacadas as características deste tipo de falta e quais os critérios de abordagem que serão seguidos, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos métodos matemáticos de análise de sinais que serão empregadas neste trabalho, destacando as aplicações e os resultados

possíveis de serem obtidos por meio da aplicação da TF, TS e TW em sinais de FAI. Pautado nessa premissa, também foram elencadas as principais classificações e métodos de detecção baseados nas peculiaridades desta modalidade de falta.

A breve revisão bibliográfica realizada nesta seção mostra que, embora haja diversas abordagens já efetuadas, ainda existem oportunidades que devem ser exploradas quanto à detecção de FAI em redes de distribuição de energia elétrica. Ademais, foram apontados os diversos desafios que devem ser superados para novas proposições de algoritmos de detecção de FAIs.

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a proposta de sistemática desta dissertação. Primeiramente, a abordagem é estruturada de forma geral, demonstrando os objetivos da realização das análises propostas. Posteriormente, são apresentadas as técnicas utilizadas para simulação do sistema elétrico e dos eventos sob análise, que serão aplicadas em todas as etapas deste estudo.

3.1 METODOLOGIA GERAL DO TRABALHO

De forma geral, este trabalho é baseado em três propostas, são elas:

- Análise de métricas de técnicas de detecção de FAIs abordadas na literatura;
- Proposição de uma método de detecção de FAIs baseado na TS - Algoritmo I;
- Evolução da primeira proposição, elaborando uma nova metodologia de técnica de detecção de FAIs baseada na TS com considerações em relação à distinção de cargas não lineares - Algoritmo II.

A fim de realizar todo o espectro de estudo desta dissertação, há uma necessidade semelhante: a simulação de sistemas elétricos, de FAIs e de outros eventos corriqueiros em SDs de média tensão. Deste modo, em todas estas análises executadas, as seguintes diretrizes em comum foram seguidas com o intuito de apresentar didaticamente os métodos elaborados:

- Todos os eventos são simulados no sistema teste de 34 barras do IEEE em diversas localizações nos seus barramentos;
- Os sinais de tensão e corrente avaliados são registrados na subestação do sistema;
- As simulações e aquisições de dados do sistema são realizados por meio do *software Alternative Transients Program (ATP)*;

- Os dados das simulações são adquiridos com a mesma taxa, sendo esta de 128 amostras por ciclo, possibilitando a análise dos sinais até a frequência de 3840 Hz;
- Os cálculos das transformadas, adição de ruídos e verificação da detecção são realizados por meio do *software* MATLAB;

O sistema teste de 34 barras do IEEE, cujo diagrama unifilar está representado na Figura 3, foi escolhido para os testes por apresentar diversas características realísticas de um SDMT, pois é um sistema real localizado no Arizona, nos Estados Unidos da América. Seus principais atributos são as cargas e capacitores distribuídos ao longo de suas barras, além de transformadores e reguladores de tensão (IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, 2010). Ademais, pelo número elevado de barras comparado aos sistemas utilizados em outros trabalhos da literatura, este sistema teste possibilita a análise das FAIs em diversas localizações. Outra característica importante é que este sistema é naturalmente desbalanceado.

Evidencia-se ainda que, além das FAIs, pretende-se avaliar os métodos de detecção de FAIs em relação a outros eventos comuns em sistemas elétricos, como conexão e desconexão de ramais, cargas e bancos de capacitores. Isto deve ser realizado pois técnicas de análise de sinais podem ser suficientes para detecção de FAIs, porém podem gerar ambiguidade detectando outros transitórios de SDs de média tensão, especialmente se os sinais forem analisados somente no domínio do tempo (LIMA *et al.*, 2016).

Figura 3 – Sistema de testes do IEEE de 34 Barras.

Fonte: IEEE Distribution System Analysis Subcommittee (2010).

A escolha de utilizar somente um ponto de medição na subestação se dá pois muitas vezes um SDMT não conta com medidores e analisadores de energia elétrica distribuídos ao longo de seus ramais, visto que estes se encontram majoritariamente na subestação dos sistemas. Por outro lado, deve-se compreender que o desligamento de todo o sistema na subestação, quando houver uma indicação de FAI, pode não ser uma boa decisão para aplicação em um SDMT.

O *software* ATP foi utilizado por meio da interface ATPDraw para a simulação do sistema teste. Este é um *software* de sistemas elétricos que tem como base o simulador *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), um dos simuladores mais utilizados para a análise de transitórios. Após a modelagem do sistema elétrico na interface ATPDraw, é gerado um arquivo de cartão do ATP que contém todos os parâmetros do sistema para a execução da simulação. Com a manipulação deste cartão, por meio de um *software* externo, é possível configurar diversas simulações para a criação de um banco de dados de forma rápida e eficiente.

A definição da aquisição de dados com 128 amostras por ciclo foi realizada dado que é uma frequência de amostragem comum em dispositivos de proteção de sistemas elétricos. É um valor não tão pequeno que impossibilite a visualização das frequências dos sinais pelas transformadas, mas não tão grande que dificulte a aplicação dos métodos em situações reais, uma vez que quanto maior a taxa de amostragem, mais caro se torna o equipamento.

O cálculo das transformadas e a elaboração do método de detecção foi realizada no *software* MATLAB. Esta é uma ferramenta extremamente versátil que possui uma linguagem de programação simples, com diversas *toolboxes* que facilitam o desenvolvimento de códigos, além de apresentar uma interface para a plotagem de gráficos, o que simplifica a visualização dos resultados. Enfatiza-se que este *software* apresenta comunicação com o ATP. Logo, as simulações puderam ser automatizadas.

3.2 METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO DE EVENTOS NO SISTEMA

Nas três análises propostas nesta dissertação, serão necessárias simulações de FAIs e de eventos transitórios comuns em SDs de média tensão. Isto posto, nesta seção são apresentadas as técnicas utilizadas para simular todos os eventos que são abordados ao longo deste trabalho.

3.2.1 Testes das FAIs de Dados Reais

Os dados de FAIs retratados nesta dissertação foram obtidos por meio de ensaios reais num campo de teste de média tensão especialmente construído para esse propósito pelos autores de Macedo *et al.* (2015). Tais ensaios consistiam na queda do condutor ao contato com solos compostos de areia, terra, cascalho, asfalto e cimento. Assim, 33 medições de corrente de sinais de FAI no ponto de falta foram registradas por meio do *Power Quality Management Software*, da Elspec. Algumas das formas de onda de corrente adquiridas estão ilustradas na Figura 4. Observa-se que os sinais de FAI diferem bastante entre si, uma vez que este é um evento aleatório. Nota-se também que as formas de onda de FAI registradas apresentam diversas características mencionadas pela literatura, como a longa duração, assimetria, patamares e *build-up*.

Após a aquisição dos sinais, estes foram inseridos no sistema teste como fonte de corrente

Figura 4 – Formas de onda de algumas das correntes de FAIs a partir do contato do condutor com uma superfície de (a) areia, (b) argila, (c) cascalho e (d) asfalto.

Fonte: Elaborada pela autora.

por meio do ambiente *Models* em linguagem Fortran no ATP. A Figura 5 mostra o esquema de inserção das FAIs reais em um sistema entre as barras fictícias x e y.

Figura 5 – Diagrama do esquema de conexão das FAIs ao sistema.

Fonte: Elaborada pela autora.

Verifica-se pela Figura 5 que para realizar a simulação da ruptura do condutor e posterior toque ao solo, foram inseridas duas chaves. A Chave 1, que deverá ser do tipo normalmente fechada, desconecta o condutor do resto do sistema. Já a Chave 2, normalmente aberta, deverá ser fechada para simular o início do contato do condutor com o solo e, consequentemente, a FAI. Para serem executados os experimentos no sistema teste do IEEE de 34 barras, tal esquema foi inserido na fase A de todas as barras, exceto da subestação.

3.2.2 Testes do Chaveamento dos Bancos de Capacitores

Grande parte da literatura acerca da detecção de FAIs aponta o chaveamento de capacitores como um dos eventos do sistema elétrico que conferem ambiguidade com FAIs. A energização de BCs podem elevar a taxa de falsos positivos em métodos de detecção de FAIs, uma vez que este transitório apresenta mudanças no conteúdo de frequência dos sinais. Por esse motivo, o chaveamento de banco de capacitores também foi testado.

A metodologia utilizada para esta simulação é pautada na caracterização do chaveamento por meio de testes baseados na inserção e remoção dos capacitores já presentes no sistema em estudo. Neste sentido, o sistema teste do IEEE de 34 barras contém dois BCs conectados paralelamente às barras 844 e 848. Pautado no intuito de avaliar a inserção e desconexão do sistema, foram inseridas chaves em série com os capacitores, como apresenta-se no esquema da Figura 6.

Em vista disto, as simulações seguiram com a realização dos chaveamentos tanto desconnectando e conectando-os no SDMT por meio da abertura e fechamento das chaves conectadas entre eles e seus ramais de alimentação.

Figura 6 – Esquema de ligação das chaves com os capacitores do sistema.

Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.3 Testes do Chaveamento das Cargas Lineares do Sistema

Outro evento que pode causar distúrbios em SDs e é normalmente utilizado para checar a eficácia de algoritmos de detecção quanto a falsos positivos, é o chaveamento de cargas. Como normalmente as FAIs apresentam corrente com valores inferiores ao patamar das correntes de carga de SDs de média tensão, o sistema pode sofrer efeitos similares quando ocorrem chaveamento de cargas e FAIs no sistema.

Neste viés, para serem realizados os testes, foram conectadas chaves em série com as CLs do sistema. O sistema teste do IEEE de 34 barras conta com 19 cargas distribuídas pelo sistema e com 6 cargas conectadas a nós pontuais.

Com o ensejo de avaliar o comportamento do sistema ao chavear as cargas, foram simulados tanto o fechamento quanto a abertura das chaves, indicando a conexão e desconexão no sistema. Deste modo, foram totalizadas 50 simulações deste tipo. O esquema de ligação da chave e das cargas está representado na ilustração da Figura 7.

Figura 7 – Esquema de ligação das chaves com as cargas do sistema.

Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.4 Testes de Chaveamento dos Ramais Laterais

Muitas vezes, quando há uma falta, um ramo do sistema pode conectar-se ou desconectar-se de forma a alterar os sinais de corrente e tensão, mesmo que estes RLs estejam localizados distantes da subestação. Ademais, ao energizar ou desenergizá-los, podem ocorrer transitórios mais impactantes do que com o chaveamento de cargas individuais ou BCs, por exemplo, dado que há uma maior concentração de carregamento.

Logo, foram realizados testes chaveando 8 ramais monofásicos do sistema para avaliar sua influência. Os trechos selecionados são os que se iniciam nas barras 808, 816, 824, 832, 858, 834 e 836. Para realizar tal simulação, foram inseridas chaves no início de cada ramal escolhido. Com o intuito de indicar o ponto em que foram inseridas as chaves e facilitar a visualização, foi elaborada a Figura 8, que mostra o esquema de inserção da chave referente ao ramo localizado entre as barras 854 e 856.

3.2.5 Simulação de Evento Não Linear - Energização de Transformadores

Ao energizar um transformador, as grandezas elétricas associadas a um sistema elétrico podem sofrer alterações devido ao transitório provocado por este evento. Tal impacto se dá pela variação harmônica durante um período de tempo, com o decaimento exponencial da

Figura 8 – Esquema de ligação das chaves com os ramais laterais do sistema.

Fonte: Elaborada pela autora.

corrente associada. Isto implica em variação harmônica ao longo do tempo, característica também encontrada em sinais associados às FAIs.

Partindo desta premissa, para simular este evento, foi observado que o sistema teste utilizado apresenta um transformador conectado na barra 832. Deste modo, nos testes cujo objetivo era a energização de transformador, foi inserida uma chave entre a barra 832 e o restante do ramal, que compreende o transformador e as barras 888 e 890, bem como suas respectivas cargas. Para demonstrar a variação da corrente com o tempo durante a energização, foram inseridas as características de curva de magnetização de um transformador real de potência similar no modelo simulado. A Figura 9 ilustra a forma de onda da corrente registrada na barra 832 durante a energização do transformador.

Figura 9 – Forma de onda da corrente registrada durante a energização do transformador.

Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.6 Simulação de Carga Não Linear - Forno a Arco

Ao longo deste trabalho, foram realizados testes com dois tipos de carga harmônica. O primeiro apresentado é o forno a arco. Este é um dos tipos de CNLs que mais causam ruídos nos sistemas elétricos, e apresenta características semelhantes a FAIs, o que dificulta na robustez dos métodos de detecção. Neste trabalho será analisado o comportamento do sistema durante a fusão do forno a arco, sendo aqui referido como a energização do forno a arco.

Com o intuito de simular tal carga, foi modelado um forno a arco no sistema baseado no Modelo Cassie (HAGINOMORI, 2003). O Forno a Arco foi modelado com uma distorção harmônica total variando em torno de 11% para a corrente e 1,55% para a tensão, com uma potência média em torno de 272 kW. As simulações consistiam na conexão e desconexão desta CNL com a barra 854. A Figura 10 mostra o diagrama unifilar do circuito do forno a arco.

Figura 10 – Circuito de forno a arco simulado.

Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.7 Simulação de Carga Não Linear - Retificador

Um outro tipo de CNL utilizada nos testes neste trabalho é o retificador, cujo diagrama unifilar está ilustrado na Figura 11. Esta carga foi simulada de modo que, a cada dois ciclos, variasse seu consumo de potência aleatoriamente entre 400 kW a 500 kW, que corresponde à potência da maior carga linear que já fazia parte previamente do sistema. A Figura 12 ilustra a forma de onda registrada na subestação durante o instante de conexão do retificador no sistema, representando seu impacto na corrente medida.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada, de maneira geral, a metodologia seguida nos estudos desta dissertação, visando propor novas análises dos métodos já existentes, bem como a proposição de novos algoritmos de detecção de FAIs. Sendo assim, foram enunciados os programas

Figura 11 – Diagrama unifilar do retificador modelado para testes.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 12 – Forma de onda de corrente com a conexão do retificador.

Fonte: Elaborada pela autora.

computacionais, o sistema teste e como cada evento foi considerado nas simulações realizadas. A partir disso, os resultados que são apresentados nas próximas seções puderam ser obtidos e analisados.

ANÁLISE DE MÉTRICAS PROPOSTAS NA LITERATURA

Ao analisar na literatura da área as propostas de detecção de FAI, percebe-se que não existe uniformidade no método de realização dos testes e análises dos algoritmos. Alguns exemplos são os diferentes sistemas teste, níveis de ruído, eventos de validação da robustez, sinais de FAI aplicados e a incerta determinação do ponto de medição. Isto posto, devido a estes motivos destacados, dificulta-se uma comparação justa entre as técnicas.

Em vista do exposto, este capítulo tem como objetivo identificar as principais métricas propostas na literatura recente cujas técnicas sejam baseadas na TF, TW e TS e analisá-las sob a mesma perspectiva de comparação. Todas as técnicas escolhidas foram avaliadas por meio de revisão crítica e estudos de simulação relativos à detecção de FAIs, com os mesmos dados de falta coletados em campo descritos no Capítulo 3. Além disto, nesta seção é proposto um conjunto de índices de avaliação para analisar as métricas de um modo quantitativo, visando a comparação sob uma perspectiva semelhante. As análises consideraram testes com a incidência de FAIs em diferentes locais do sistema e com ruído adicionado às medições de corrente de falta. Os resultados enfatizam a necessidade de executar testes para avaliar qualquer método de detecção de FAI em relação à sua capacidade de distinguir eficientemente a FAI e outras ocorrências comuns em SDs de média tensão. Por fim, ressalta-se que o intuito deste capítulo não é propor um novo método de detecção de FAI, mas destacar fatores-chave e métricas que podem ser empregadas para melhorar as técnicas de detecção de FAIs existentes.

4.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Nesta seção serão apresentadas as métricas escolhidas para estudo e os índices propostos para avaliá-las. As métricas foram escolhidas dentre as apresentadas no Capítulo 2 que são baseadas na TF, TS e TW. Já os índices foram indicados com o objetivo da obtenção de valores

numéricos para o estabelecimento de margens para uma análise quantitativa do funcionamento das métricas escolhidas. Destaca-se que serão avaliadas somente as métricas nas quais as técnicas da literatura foram baseadas, e não os métodos de decisão e limiares utilizados em cada uma delas.

4.1.1 Descrição das Métricas Escolhidas

Selecionar métricas apropriadas para a detecção de FAIs não é uma tarefa simples, dada sua grande variedade. Para realizar os testes de comparação deste capítulo, foram selecionadas métricas publicadas na literatura recente e que apresentavam fácil aplicabilidade e implementação. Com o intuito de simplificar a apresentação dos resultados, cada métrica recebeu um código para facilitar a identificação nas seções a seguir.

4.1.1.1 Métricas Baseadas na Transformada de Fourier

Fundamentando-se nas características das métricas apresentadas no Quadro 4 do Capítulo 3, foram definidas algumas técnicas para avaliação. As métricas escolhidas que são baseadas em transformadas advindas da TF estão apresentadas no Quadro 7. As primeiras quatro métricas (TF1 a TF4) são baseadas na TFTC e são fundamentadas na extração da amplitude da 2^a, 3^a e 5^a ordens harmônicas e do ângulo da 3^a ordem harmônica, aplicando uma janela de Blackman–Harris com tamanho igual a cinco ciclos (LIMA *et al.*, 2018b). Já as métricas advindas da FFT (TF5 e TF6), obtidas do trabalho de Soheili, Sadeh e Bakhshi (2018), determinam a detecção de FAIs por meio do cálculo da razão entre as harmônicas de 7^a e 3^a ordem, e entre a 5^a e 3^a ordem.

Quadro 7 – Métricas escolhidas baseadas na Transformada de Fourier

Transformada	Transformada de Fourier de Tempo Curto				<i>Fast Fourier Transform</i>	
Código	TF1	TF2	TF3	TF4	TF4	TF6
Métrica	Amplitude	Amplitude	Amplitude	Ângulo	Amplitude	Amplitude
Ordem harmônica	3 ^a	2 ^a	5 ^a	3 ^a	$\frac{7^a}{3^a}$	$\frac{5^a}{3^a}$

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.1.2 Métricas Baseadas na Transformada de Stockwell

As métricas escolhidas para análise extraídas de trabalhos da literatura que se baseiam na TS para detecção de FAIs estão apresentadas no Quadro 8. Estas métricas advêm dos trabalhos de Samantaray, Panigrahi e Dash (2008) e de Lima, Brito e Souza (2019). Samantaray, Panigrahi e Dash (2008) propõem o uso de métricas, aqui nomeadas TS1, TS2, TS3 e TS4, respaldadas na energia e no desvio padrão da matriz da TS no domínio do tempo e também da frequência. Já Lima, Brito e Souza (2019) propõem o uso da análise do desvio padrão do ângulo da 3^a ordem harmônica do sinal de corrente (TS5), que segundo os autores, tende a diminuir durante a FAI.

Quadro 8 – Métricas escolhidas baseadas na Transformada de Stockwell.

Código	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5
Métrica	Energia da MTS*	Energia da MTS*	Desvio padrão da MTS*	Desvio padrão da MTS*	3ª ordem harmônica
Especificação	Domínio da frequência	Domínio do tempo	Domínio da frequência	Domínio do tempo	Ângulo

Notas:

*MTS: Matriz da Transformada de Stockwell

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.1.3 Métricas Baseadas na Transformada Wavelet

Das métricas propostas por técnicas baseadas na TW, foram escolhidas nove. As seis primeiras (TW1 a TW6) foram selecionadas do trabalho de Sedighi *et al.* (2005), que consiste na metodologia em que Valor Eficaz, do inglês *Root Mean Square* (RMS) e médio das resoluções na TW na faixa entre 2 e 10 kHz são capazes de caracterizar uma FAI. Por outro lado, de acordo com Lai *et al.* (2005), a razão entre o valor RMS das decomposições da TW até 600 Hz para tensão e até 300 Hz para a corrente, podem prover resultados satisfatórios para detectar FAIs. Em resumo, as métricas escolhidas que se baseiam na TW para detecção de FAIs são apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Métricas escolhidas baseadas na Transformada Wavelet.

Detalhes	Frequência de 2 a 10 kHz Wavelet mãe ReverseBior 3.1						<300 Hz (tensão) e <600 Hz (corrente) Wavelet mãe Daubechies 4		
Código	TW1	TW2	TW3	TW4	TW5	TW6	TW7	TW8	TW9
Métrica	Média	RMS*	Média	RMS*	Média	RMS*	RMS* da corrente	RMS* da tensão	RMS*
Frequência (Hz)	3840-7680	3840-7680	5670-7680	5670-7680	3840-5670	3840-5670	<600	<300	$\frac{TW7}{TW8}$

Notas:

*RMS: Valor Médio Quadrático, do inglês *Root Mean Square*

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2 Obtenção dos Índices

Com o objetivo de analisar e quantificar o desempenho das métricas apresentadas nos Quadros 7, 8 e 9, uma quantidade suficiente de testes deve ser realizada para que uma faixa de parâmetros realísticos do sistema deva ser adquirido. Adicionalmente, cada método de detecção de FAIs utiliza uma métrica diferente, com diferentes escalas e parâmetros. Portanto, com o objetivo de prover uma análise objetiva e sem viés de preferências, um método de obtenção de índices é apresentado nesta seção.

Os índices são baseados nas informações das métricas pré (x_{pre}) e pós evento (x_{pos}). Nesta análise foi considerado que o pós-evento compreende o período imediatamente após o instante de incidência dos eventos no sistema. Neste sentido, com o intuito de medir o impacto dos eventos nas métricas, dois tipos de índices foram utilizados: os índices de margem e os índices de repetição.

4.1.2.1 Índices de Margem

Os índices de margem foram criados para verificar a diferença nas métricas antes e depois da ocorrência de um evento. O primeiro índice de margem é a taxa de desvio padrão $stdr$, que está definido na Equação (4.1). Este índice foi elaborado com o objetivo de avaliar a mudança no desvio padrão das métricas, dado que é esperado que estas variem devido aos efeitos causados pelas FAIs nos sinais registrados durante sua ocorrência.

$$stdr = \frac{std(|x_{pos}|)}{std(|x_{pre}|)} \quad (4.1)$$

Nos algoritmos de detecção de FAIs, normalmente uma margem é definida para comparar as métricas antes e após o evento. Neste trabalho, as margens são estabelecidas de acordo com a soma do valor máximo com o desvio padrão de cada período p (pré ou pós-evento). A margem m_p para as métricas que aumentam ou diminuem durante a FAI são calculadas de acordo com a Equação (4.2).

$$m_p = \begin{cases} \max(|x_p|) + std(|x_p|), & \text{para métricas que aumentam} \\ \max(|x_p|) - std(|x_p|), & \text{para métricas que diminuem} \end{cases} \quad (4.2)$$

em que p significa pos ou pre , indicando o período pós ou pré evento.

Em vista disso, apresenta-se o segundo índice de margem, que foi desenvolvido para medir a variação das métricas antes e após a falta. Este índice investiga o impacto das FAIs e a faixa de aplicação em que um limiar poderia ser definido. Deve-se destacar que o índice de margem replica o funcionamento da detecção de grande parte das técnicas propostas na literatura da área. Isto posto, o índice de razão de margem mr pode ser calculado de acordo com a Equação (4.3).

$$mr = \frac{m_{pos}}{m_{pre}} \quad (4.3)$$

4.1.2.2 Índices de Repetição

Os índices de repetição foram elaborados com a finalidade de verificar o comportamento das métricas ao longo do tempo. A ideia principal partiu do fato das FAIs serem um fenômeno considerado de longa duração. Assim, os métodos poderiam ser incrementados ao verificar, ao

longo do tempo, o comportamento das métricas que as detectam. Diante disto, apresenta-se o índice cm , que a cada amostra k , conta o número de vezes que a métrica pós-evento excede a margem pré-evento, como apresentado na Equação (4.4).

$$cm = cm + 1, \text{ se } x_{post}[k] > m_{pre}[k] \quad (4.4)$$

O segundo índice de repetição elaborado, o tm , mede a quantidade de tempo que a métrica pós-evento excede a margem pré-evento. Este índice tem como objetivo revelar a característica de repetição de métricas, mas em relação ao tempo.

Por fim, a Figura 13 ilustra os quatro índices aqui mencionados em uma forma de onda didática, com o objetivo de exibir, simplificada, o funcionamento dos índices elaborados.

Figura 13 – Ilustração dos índices.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.1.3 Metodologia das Simulações

O método de simulação deste capítulo foi elaborado de acordo as orientações elucidadas no Capítulo 3. Como apresentado previamente, foi utilizado o sistema teste do IEEE de 34 barras (IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, 2010), no qual os testes de robustez das métricas foram realizados. Os testes executados neste capítulo consistem nas simulações de chaveamentos de CL, BC, RL, e de CNL (neste caso foi utilizado o forno a arco), além da ET.

Identifica-se que os sinais utilizados foram escolhidos de acordo com cada proposta, sendo que os dados de corrente e/ou tensão, de uma fase ou de todas, foi replicado do mesmo modo que nas propostas na bibliografia.

Nas análises dispostas neste capítulo, as simulações foram efetuadas com a adição de um ruído com RSR igual a 30 dB aos sinais. Em todos os casos, os dados foram adquiridos por um único ponto de medição na subestação (barra 800) e todos os eventos foram simulados por 2

segundos, com 1 segundo de regime permanente. Isso se decorreu para avaliação dos índices pré-evento e para facilitar o cálculo dos índices propostos.

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os principais resultados obtidos pelas simulações são apresentados e discutidos. As análises se concentram na obtenção de métricas referentes aos diversos testes mencionados. Os resultados são apresentados de acordo com os índices de margem (*mr* e *stdr*) e os índices de repetição (*cm* e *tm*).

4.2.1 Análise da influência do ruído na detecção da FAI

A fim de examinar a influência do ruído nas performances das métricas, a Tabela 1 apresenta o valor mediano dos índices de margem (*mr* e *stdr*) e dos índices de repetição (*cm* e *tm*) entre todas as barras do sistema em relação a todas as métricas analisadas, para a condição sem a adição de ruído e também para um ruído com RSR de 30 dB. Para interpretar esta tabela, admite-se o seguinte exemplo: o valor de *cm* para TF1 com uma RSR de 30 dB é igual a 47, mostrando que a maioria dos casos de FAIs produziram este valor em relação a esta métrica. Assim, quanto maior o valor do índice, mais fácil será a detecção da falta, uma vez que um limiar superior e seguro pode ser estabelecido. A mesma análise se aplica aos índices de margem, em que as métricas que apresentam valores maiores apresentariam maior possibilidade de sucesso na detecção de FAIs. Ademais, por meio dos resultados expostos, é evidente a influência do ruído nas métricas. Observa-se que o índice *stdr* apresentou resultados superiores em relação ao índice de margem *mr*, mas do mesmo modo o índice de relação do desvio padrão, *stdr*, é afetado pelo ruído, uma vez que este pode influenciar em seu cálculo. Por fim, destaca-se que métricas que apresentaram alto valor do índice para condições sem ruído e diminuem seu valor com a adição de ruído, como a TW2, TW3 e TW4 para o *stdr*, e as métricas TF4, TF5, TF6, TW3 e TW5 para os índices de repetição *cm* e *tm*, são avaliadas como dependentes do ruído adicionado aos sinais. Por outro lado, métricas que apresentaram resultados similares dos índices independente do ruído mostram maior aplicabilidade para situações reais, como as métricas TF1, TF3, TF4, TW2, TW6, TW7, TW8, TW9, TS1, TS2 e TS4, que exibem o mesmo valor do índice de margem *mr* com e sem a adição de ruído.

Além do exposto, nessa análise também foi proposto o uso de índices de repetição para detecção de FAIs, e, neste sentido, a Tabela 1 evidencia os resultados satisfatórios alcançados pelas métricas TF1, TF2, TS1, TS2, TS4, TW6, TW7 e TW9, mesmo com a inserção de ruídos aos sinais.

De modo geral, os índices de repetição com valores maiores que 1 indicam que a FAI foi identificada pela métrica por um longo período, o que torna tal métrica uma boa ferramenta

Tabela 1 – Valor mediano dos índices de margem e repetição para FAIs sem ruído e com a adição de ruído com RSR igual a 30 dB.

	Índices de repetição				Índices de margem			
	30 dB		Sem ruído		30 dB		Sem ruído	
	<i>cm</i>	<i>tm</i>	<i>cm</i>	<i>tm</i>	<i>mr</i>	<i>stdr</i>	<i>mr</i>	<i>stdr</i>
TF1	47	6015	47	6015	1,2	5,6	1,2	87
TF2	47	6015	47	6015	1,2	3,6	1,3	110
TF3	47	6015	47	6015	1,2	8,2	1,2	75
TF4	0	0	1	128	1,2	16,0	1,2	797
TF5	0	0	46	46	0,4	0,3	0,6	180
TF6	0	0	44	44	0,3	0,4	0,5	243
TS1	47	47	47	47	1,5	7,4	1,5	1840
TS2	47	47	47	47	1,3	4,8	1,3	1138
TS3	7	7	27	27	4,8	4,3	14,1	15
TS4	47	47	47	47	1,2	14,5	1,2	9940
TS5	0	0	4	4	0,1	0,9	1,0	12
TW1	0	0	2	2	1,7	0,7	1,3	247
TW2	46	46	46	46	0,9	3,4	0,9	7707
TW3	0	0	44	44	1,0	0,7	0,3	11992
TW4	19	19	40	40	0,4	1,4	0,5	9555
TW5	0	0	38	38	1,0	0,7	0,2	220
TW6	47	47	47	47	1,0	2,9	1,0	5767
TW7	47	47	47	47	1,2	12,2	1,2	202
TW8	42	42	47	47	1,0	1,4	1,0	816
TW9	47	47	47	47	1,8	20,7	1,8	622

Fonte: Elaborada pela autora.

para distinguir FAIs de outros eventos. Adicionalmente, quando comparados com os índices de margem, verifica-se que os índices de repetição são menos afetados pelo ruído.

4.2.2 Análise da Taxa de Detecção e Distinção de Outros Eventos

Tão importante quanto a detecção precisa da FAI é a capacidade das métricas para distingui-la corretamente de outros eventos comuns em um SDMT. Nesta análise, foram realizadas simulações assumindo seletividade total (nenhum outro evento aciona a proteção). Para fazer isso, os valores máximos de *mr* e *stdr* foram obtidos entre todos os eventos que não são FAIs. Em seguida, estes índices máximos de não falta foram comparados com os índices de cada sinal de FAI para cada solo, em cada barramento do sistema, totalizando 1089 comparações para cada nível de ruído. Ao realizar este procedimento, o comportamento de um método de detecção é replicado, no qual os índices são comparados com os respectivos valores máximos de não falta. Assim, considerando a distinção entre todos os outros eventos, a taxa de detecção das FAIs está listada nas quatro primeiras colunas da Tabela 2.

Deste modo, a Tabela 2 indica a porcentagem de casos de FAIs que podem ser identi-

ficadas por cada métrica se um limite seguro for definido, ou seja, um limiar que garanta que nenhuma operação falsa ocorra devido a eventos que não são FAIs. Por exemplo, se um limite igual a zero for definido, todas as FAIs serão detectadas, porém a proteção não será seletiva porque todos os outros eventos também acionarão a proteção. Portanto, ao elevar o limiar para um valor em que a proteção seja totalmente seletiva, a Tabela 2 mostra a porcentagem de FAIs que ainda serão detectados.

Os resultados considerando a distinção de todos os eventos destacam o baixo nível de detecção alcançado pelas métricas, independentemente do nível de ruído. Ademais, observa-se que algumas métricas, como a TS3 e TS4, aumentaram a taxa de detecção com a adição de ruído, indicando que estas métricas são muito sensíveis aos ruídos, confundindo sua característica com a da FAI.

Atribui-se os baixos níveis de detecção de algumas métricas à dificuldade da distinção de eventos com efeitos similares às FAIs, como aqueles que provocam variação harmônica ao longo do tempo. Assim, com o intuito de aumentar a taxa de detecção dos métodos, deve haver uma distinção entre os eventos que persistem ao longo do tempo e aqueles que apresentam variações instantâneas. Para distingui-los de FAIs, atrasos podem ser utilizados na detecção, como realizado em Macedo *et al.* (2015), Lima *et al.* (2018a) e Lima, Brito e Souza (2019). Salienta-se que os eventos de longa duração tendem a ser evidentes quando se aplicam índices de repetição.

Seguindo com as análises, constata-se que também foram realizados testes em que as métricas foram avaliadas em relação a outros eventos comuns e dos quais as FAIs devem ser distintas. Dentre esses eventos, cita-se a Energização de Forno a Arco (EFA), também chamado de período de fusão do forno a arco, e também a ET. As últimas quatro colunas da Tabela 2 mostram o aumento na taxa de detecção de FAIs das métricas ao remover os eventos não lineares duradouros mencionados, isto é, não foi considerada a distinção destes eventos para a elaboração do limiar.

Ao analisar soluções para este tipo de problema na literatura acerca da detecção de FAIs, nota-se que no trabalho de Macedo *et al.* (2015) é proposta uma solução para lidar com uma máquina de solda, vinculando as características das FAIs quando elas ocorrem em apenas uma fase. A EFA afeta as três fases do sistema ao mesmo tempo, o que é muito menos provável de ocorrer durante FAIs, fornecendo uma solução ideal para esse problema. Desta maneira, nesta dissertação também é proposto o uso desta técnica para distinguir as FAIs da ET, uma vez que esse evento também implica variações harmônicas nas três fases do sistema. Portanto, nos métodos de detecção, se houver variações nos índices de sinais das três fases, tal evento não deve ser classificado como FAI. Uma aplicação de tal proposta em uma técnica de detecção de FAIs será realizada no Algoritmo II, apresentado no Capítulo 6.

Por fim, os resultados da taxa de detecção da Tabela 2 mostram que as métricas TW7 e TW9 têm as mais altas taxas de identificação de FAIs pelos índices de repetição e também

Tabela 2 – Porcentagem da taxa de detecção de FAIs pelos índices de margem considerando a distinção de outros eventos.

	Distinção de todos os eventos				Distinção dos eventos, exceto EFA* e ET*			
	30 dB		Sem ruído		30 dB		Sem ruído	
	<i>mr</i> (%)	<i>rstd</i> (%)	<i>mr</i> (%)	<i>rstd</i> (%)	<i>mr</i> (%)	<i>rstd</i> (%)	<i>mr</i> (%)	<i>rstd</i> (%)
TF1	37	21	36	0	52	53	52	53
TF2	33	30	32	0	53	63	52	63
TF3	48	18	48	0	51	42	51	42
TF4	37	25	37	0	46	25	47	25
TF5	2	0	0	10	35	0	25	0
TF6	3	0	0	3	16	0	7	0
TS1	45	7	45	0	46	81	45	81
TS2	44	7	44	0	45	70	45	70
TS3	30	20	17	17	60	63	18	63
TS4	44	22	44	0	45	87	45	87
TS5	0	1	0	88	1	1	0	1
TW1	3	2	14	0	42	2	45	2
TW2	22	44	21	13	23	64	21	64
TW3	1	4	2	66	32	5	5	5
TW4	14	36	10	32	17	36	10	36
TW5	1	3	1	0	41	3	1	3
TW6	43	33	42	9	44	62	43	62
TW7	46	26	46	0	48	100	48	100
TW8	2	17	3	12	2	17	3	17
TW9	59	60	59	19	63	94	64	94

Notas:

*EFA: Energização de Forno a Arco

*ET: Energização de Transformador

Fonte: Elaborada pela autora.

pelos de margem. Salienta-se que houve crescimento da porcentagem de detecção por estas métricas ao distinguir os eventos de longa duração, sendo que TW7 e TW9 apresentaram taxa de detecção de 100% e 94% em relação ao índice *rstd*, respectivamente. Atenta-se que mesmo sem a distinção dos eventos de variação harmônica temporal, as métricas mencionadas apresentaram as maiores taxas de identificação de FAIs em relação às outras métricas analisadas. Adicionalmente, constata-se que as métricas TS1, TS2, TS3, TS4, TW2 e TW6 apresentam resultados promissores e podem ser aprimoradas em trabalhos futuros.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Nesse capítulo foram propostos índices para as métricas baseadas na TF, TW e TS. O objetivo principal fora estabelecer uma base comum e sistemática para comparação das métricas obtidas por meio das transformadas mencionadas.

Quando as métricas foram calculadas, obtiveram-se diversas descobertas, como a importância de serem realizados testes com a adição de ruído aos sinais. Tais análises devem ser realizadas pois os resultados revelaram que, ao aumentar o nível de ruído, as métricas diminuíam sua precisão. Adicionalmente, um dos principais destaques dos resultados é a evidente necessidade da distinção das FAIs de outros eventos comuns em sistemas elétricos. Ao considerar 100% da distinção, isto é, total seletividade, a precisão das métricas diminuiu consideravelmente. Neste sentido, é evidente a importância de considerar a inserção de grandes cargas harmônicas variantes no sistema, como EFA e ET, para comprovar a resolução dos métodos. Somente após essas análises, as propostas podem especificar as condições do sistema em que a técnica é válida.

Uma prática comum na proteção convencional é comparar quantidades medidas com limiares pré-definidos, sem considerar nenhuma repetição. No entanto, como analisado neste capítulo, a repetição e persistência ao longo do tempo é uma característica distintiva de FAIs. Por conseguinte, o uso de métricas de repetição juntamente com os limites comuns pode contribuir para a detecção e a distinção entre FAIs e outros eventos.

Adicionalmente ao exposto, destacam-se os resultados superiores alcançados pelas métricas TW7 e TW9. Evidenciam-se, também, as métricas TS1, TS2, TW6 e TS4, que podem ser aprimoradas e, ainda, aliadas ao desenvolvimento de novos métodos.

Os resultados alcançados neste capítulo podem ajudar futuros autores de algoritmos de detecção de FAIs no processo de construção de seus métodos. Para isso, as propostas de identificação de FAIs devem ter limites de aplicabilidade muito bem delimitados, que podem ser alcançados por meio dos testes definidos nesta dissertação.

Enfatiza-se, por fim, que as técnicas baseadas na TW e na TS se destacaram quando comparadas aos métodos baseados na TF. No entanto, mesmo com os resultados satisfatórios alcançados por algumas métricas baseadas na TW, a ampla gama de escolhas de parâmetros como a família de wavelet e faixa de frequência, implica na não objetividade para definição de um algoritmo de detecção. Isto posto, pela assertividade na aplicação, pela notável possibilidade de aprimoramento e resultados promissores exibidos, nos próximos dois capítulos serão propostos algoritmos de detecção de FAIs baseados na TS.

PROPOSTA DO ALGORITMO I

Este capítulo apresenta a primeira proposta de detecção de FAIs desta dissertação. São apresentados, primeiramente, os objetivos e as principais contribuições deste método nesta área de pesquisa. Posteriormente, são evidenciadas a metodologia elaborada, os testes realizados e os resultados alcançados.

Deve-se salientar que o Algoritmo I tem como intuito preencher, de forma inicial, algumas lacunas levantadas na bibliografia em relação aos trabalhos com técnicas baseadas na TS. Para tal, elencam-se algumas das características desta proposição:

- A aplicação de FAIs em diversas barras ao longo do sistema teste com um único ponto de medição;
- O uso de um limiar auto-adaptativo, que se adéqua às condições do sistema e não necessita de técnicas de aprendizado de máquinas;
- A adição de ruído aos sinais adquiridos e o estudo de seu impacto na taxa de identificação das técnicas de detecção de FAI;
- A consideração do tempo de queda do condutor nas simulações, o que implica em maior dificuldade na elaboração do limiar adaptativo. Destaca-se que nenhum dos outros trabalhos levantados realiza esta consideração;
- Testes considerando a total distinção pelo método entre FAIs e outros eventos comuns em SDs de média tensão, incluindo cargas não lineares, neste caso representada por um retificador. Nos métodos da literatura baseados na TS, não houve consideração deste tipo de carga nos testes;
- Utilização de dados reais de FAIs, o que implica em um maior comprometimento de aplicação prática da técnica.

Neste capítulo é proposta uma técnica de detecção de FAIs a partir de harmônicos extraídos da TS, uma vez que as métricas derivadas desta transformada necessitam de ajustes e contribuições. A TS apresenta como vantagem prover a amplitude e fase das frequências dos sinais a cada amostra, ao contrário de algoritmos de FFT. Além disto, a TS não possui dependência com tamanho e forma da janela, como STFT. Adiciona-se ainda que não há questionamento quanto à aplicação de valores ainda não estabelecidos, como no caso da definição de parâmetros relacionados à TW.

Deste modo, o Algoritmo I representa a proposta de um método de detecção de FAIs baseado na variação de energia das harmônicas obtidas por meio do cálculo da TS dos sinais de corrente da fase sob falta registrados na subestação do sistema de 34 barras do IEEE. O método de decisão é baseado no cálculo de um limiar adaptativo fundamentado na repetição deste comportamento por um período de tempo. Os resultados alcançados se mostraram promissores.

5.1 METODOLOGIA PROPOSTA

De acordo com Lima *et al.* (2018a), devido ao arco elétrico, a forma de onda da corrente registrada durante uma FAI possui não linearidade. Tal característica implica na vasta presença de harmônicos de até 10^a ordem nos sinais associados a este tipo de falta. Ademais, de acordo com os estudos apresentados no Apêndice A, a componente fundamental e as harmônicas de até 7^a ordem estão presentes em sinais registrados independente da localização da falta. Portanto, baseado nestes estudos, foi proposto o método descrito no fluxograma da Figura 14. Em resumo, o método é composto inicialmente na aquisição de sinais de corrente na subestação do sistema, que são posteriormente filtrados e processados pela TS utilizando uma janela de um ciclo completo deslizando a cada ciclo. A variação de energia de cada harmônica entre duas janelas consecutivas é comparada a um limiar para detectar a ocorrência de transitórios no sinal. Se um transitório for identificado, o algoritmo poderá detectar a FAI distinguindo-a de outros eventos. Caso contrário, o limiar se atualizará automaticamente.

Partindo do exposto, nas próximas subseções serão explicadas detalhadamente cada fase apresentada no fluxograma da Figura 14.

5.1.1 Filtragem da Corrente e Extração das Características

O ruído em um SDMT ocorre de forma aleatória no espectro de frequência dos sinais e pode causar incertezas nas medições de tensão e/ou corrente (TAN; RAMACHANDARA-MURTHY, 2010). Em sistemas elétricos, o ruído pode ser modelado utilizando o ruído branco gaussiano, que é adicionado aos sinais com o nível de ruído n_m que corresponde a uma porcentagem da frequência fundamental f_1 . Ele normalmente é mencionado em RSR e medido em

Figura 14 – Fluxograma principal do Algoritmo I.

Fonte: Elaborada pela autora.

Decibéis (dB), como demonstra a Equação (5.1) (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010).

$$RSR = 20 \cdot \log \left(\frac{RMS(\sin(2\pi f_1 t))}{RMS(n_m \cdot WGN(t))} \right) \quad (5.1)$$

Guiado pelo propósito de evitar os impactos negativos do ruído nos sinais, o método proposto aplica uma técnica de filtragem usando um filtro *Butterworth* passa-baixa com uma frequência de corte de 540 Hz. Somente frequências de sinal de até 420 Hz (7ª ordem harmônica) são consideradas neste método. Então, para cada janela, a TS gera uma matriz de resposta com amplitude e fase, na qual as linhas representam as ordens harmônicas e as colunas caracterizam as amostras dentro da janela. Portanto, o método calcula o espectro de energia (ϵ) para cada amplitude harmônica (h) dentro de uma janela (w) da primeira amostra k_1 até a última, k_2 . Este cálculo da energia é realizado de acordo com o Teorema de Parseval (LATHI; GREEN, 2005), como exhibe a Equação (5.2).

$$\epsilon_w^h = \sum_{k=k_1}^{k_2} |S[h, k]|^2 \quad (5.2)$$

Depois disto, é criada a Matriz de Energia da Transformada de Stockwell (**METS**) que contém a energia de cada ordem harmônica (h) a cada janela de um ciclo (w), como representa a

Equação (5.3).

$$METS_{h \times w} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^1 & \varepsilon_2^1 & \dots & \varepsilon_w^1 \\ \varepsilon_1^2 & \varepsilon_2^2 & \dots & \varepsilon_w^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_1^h & \varepsilon_2^h & \dots & \varepsilon_w^h \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

5.1.2 Cálculo da Variação de Energia das Harmônicas

A variação de energia Θ entre duas janelas w consecutivas é calculada de acordo com a Equação (5.4), para cada ordem harmônica h .

$$\Theta_w^h = |\varepsilon_w^h - \varepsilon_{w-1}^h|, \text{ para } w > 1 \quad (5.4)$$

A estratégia deste algoritmo é considerar a variação dos nove últimos ciclos das sete primeiras ordens harmônicas da corrente, calculadas de acordo com a Equação (5.4), para construir uma matriz M , como mostra a Equação (5.5). Logo, quando é calculada a TS e posteriormente a energia de nova janela do sinal, consequentemente gerando uma nova janela de variação de energia, a matriz M é atualizada. O método proposto utiliza nove variações de energia, que correspondem a nove ciclos (150 ms no sistema de 60 Hz utilizado), com o intuito de esperar que os dispositivos de proteção convencionais operem no caso de um transitório com corrente suficiente para ser detectado, como é o caso das faltas de baixa impedância. Isso foi realizado considerando que a filosofia de proteção da distribuidora de energia elétrica assuma esses nove ciclos. Normalmente, a proteção principal em um SDMT opera em tempo menor que os 150 ms mencionados (SANTOS *et al.*, 2017).

$$M_{7 \times 9} = \begin{bmatrix} \Theta_1^1 & \Theta_2^1 & \dots & \Theta_9^1 \\ \Theta_1^2 & \Theta_2^2 & \dots & \Theta_9^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Theta_1^7 & \Theta_2^7 & \dots & \Theta_9^7 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Isto posto, após atualizar a matriz M em um ciclo k , o índice $\mu_{(k)}^h$ é calculado por meio da Equação (5.6) para a soma das últimas nove variações e para cada ordem harmônica h . Este índice é utilizado para calcular o limiar, e sua variação (entre dois ciclos consecutivos) é um critério para atualizá-lo, como será elucidado ao longo das próximas seções.

$$\mu_{(k)}^h = \sum_{x=1}^9 \Theta_{(x)}^h : : h = 1, 2, \dots, 7. \quad (5.6)$$

5.1.3 Limiar Auto-adaptativo

Nesta subseção será apresentada a proposição de algoritmo de limiar auto-adaptativo, que seja imune a ruídos em regime permanente, mantendo sua adaptação em relação às condições do sistema, e que não atualize durante transitórios. Para que o limiar só seja alterado em regime permanente, é proposto o uso da variável τ , que indica a existência de um transitório no sistema.

A variação entre o ciclo atual (k) e o anterior ($k - 1$) deve ser inferior à constante δ (que existe para que o limiar não seja atualizado em razão dos ruídos em regime permanente), como mostra a Equação (5.7). Caso a variação não seja inferior ao limiar adicional, o sistema deve estar em uma condição transitória, e, portanto, o limiar não deve ser atualizado. Destaca-se que o método utiliza a variação da soma dos últimos nove ciclos para garantir que a variação seja originada de um evento no sistema e não do ruído.

$$\tau = \frac{|\mu_{(k)}^1 - \mu_{(k-1)}^1|}{\mu_{(k-1)}^1} = \frac{\Theta_{(k)}^{soma}}{\mu_{(k-1)}^1} \leq \delta \quad (5.7)$$

Caso a condição exposta na Equação (5.7) seja satisfeita, o limiar deverá ser atualizado. Em seguida, a técnica proposta aplica a variável $L_{(k)}^h$ para calcular o limiar para cada harmônica a cada ciclo k . $L_{(k)}^h$ é o menor valor entre seu valor prévio multiplicado por um fator de saturação α e a média de $\mu_{(k)}^h$ nos últimos nove ciclos para cada harmônica (que é o valor inicial de $L_{(k)}^h$). O uso do fator α é pautado na prevenção de variações bruscas no limiar. Sendo assim, $L_{(k)}^h$ é definida de acordo com a Equação (5.8).

$$L_{(k)}^h = \min \left(\alpha \cdot L_{(k-1)}^h, \frac{\mu_{(k)}^h}{9} \right) : : h = 1, 2, \dots, 7. \quad (5.8)$$

Adicionalmente, há uma outra variável para ser determinada, o $L_{(k)}^{soma}$, que foi criado com o intuito de garantir que não existam falsas indicações em condições ruidosas, pois esta variável considera nove ciclos, e variações aleatórias que ocorrem em somente um ciclo não a afetariam. Os índices $L_{(k)}^h$ variam de acordo com cada janela (cada ciclo), mas eles podem ser afetados pelo ruído. Como a variável $L_{(k)}^{soma}$ considera nove ciclos, somente mudanças substanciais podem afetá-la. Então, $L_{(k)}^{soma}$ é utilizada para identificar quando a variação de nove ciclos aumenta. Esta variável assume o menor valor entre seu valor no ciclo anterior multiplicado por um fator de saturação α e o valor da soma da fundamental $\mu_{(k)}^1$ (que é o valor inicial de $L_{(k)}^{soma}$), como pode ser observado na Equação (5.9).

$$L_{(k)}^{soma} = \min \left(\alpha \cdot L_{(k-1)}^{soma}, \mu_{(k)}^1 \right) \quad (5.9)$$

Quando uma FAI ocorre, a corrente de falta é nula durante a queda do condutor. Para evitar a detecção falta nessa situação devido a ruídos, o tempo de queda do condutor é considerado

inserindo um fator β . O uso de β aumenta os limites da variação de energia para um valor bem maior que a variação de energia na condição de estado estacionário. Uma discussão sobre o valor de β para cada ordem harmônica e para $\mu_{(k)}^h$ é apresentada na próxima seção.

Finalmente, os limiares de detecção $\gamma_{(k)}^h$ e $\gamma_{(k)}^{soma}$ são definidos pelo produto entre β e $L_{(k)}^h$ e $L_{(k)}^{soma}$, respectivamente. Portanto, a Equação (5.10) apresenta o cálculo de $\gamma_{(k)}^h$, que é o limiar de detecção para a variação de energia de cada ordem harmônica h a cada duas janelas consecutivas. Já a Equação (5.11) mostra o cálculo de $\gamma_{(k)}^{soma}$, que é o limiar de detecção para $\mu_{(k)}^1$, que significa a soma dos últimos nove ciclos para a componente fundamental do sinal.

$$\gamma_{(k)}^h = \beta^h \cdot L_{(k)}^h \quad (5.10)$$

$$\gamma_{(k)}^{soma} = \beta^{soma} \cdot L_{(k)}^{soma} \quad (5.11)$$

5.1.4 Confirmação da FAI

Com o propósito de garantir a confiabilidade do método proposto, a ocorrência de uma FAI é confirmada se as características de variação se mantiverem durante nove ciclos. Este atraso de tempo foi escolhido para confirmação, pois FAIs podem durar mais de nove ciclos, diferentemente de outros eventos transitórios que devem ser distintos deste tipo de falta.

O método proposto utiliza 5 contadores para garantir que uma FAI é detectada. O primeiro contador, c^I , se refere ao componente fundamental e é incrementado sempre que a variação de energia entre o ciclo atual e o anterior apresenta valor maior que seu limiar específico. O segundo contador, c^{II} , avalia as harmônicas pares e é incrementado sempre que a variação de energia da 2ª e 4ª ou 6ª ordens harmônicas forem maiores que seus respectivos limiares. O terceiro contador c^{III} faz o mesmo, mas em relação à 3ª ordem harmônica. Por fim, o quarto contador c^{IV} aumenta seu valor em um a cada vez que a variação de energia da 5ª ou 7ª ordens harmônicas excedem seus respectivos limiares.

Quando as condições especificadas para os quatro primeiros contadores não são satisfeitas, eles são decrementados em 1 com um valor mínimo de zero. Ademais, só há a indicação de FAI se os contadores c^I , c^{II} , c^{III} e c^{IV} forem maiores que nove, simultaneamente. Deste modo, como mencionado previamente, o método utiliza estes 9 ciclos de confirmação para poder distinguir as FAIs de outros transientes que não causam variações nos sinais por um longo período.

O último requerimento para a detecção é contador c^V , que deve apresentar ao menos metade do valor de c^I . O contador c^V é incrementado em 1 quando a soma da variação de energia da frequência fundamental dos últimos nove ciclos é maior que o limiar da soma previamente apresentado na Equação (5.11). A diferença entre o contador c^V e os outros contadores é que, quando esta condição não é satisfeita, ele assume valor nulo. A justificativa para o uso deste

contador é que ele representa a soma da variação, que acontece de forma suave ao longo do tempo, pois considera diversos ciclos. Quando é realizada a comparação entre c^V e c^I , a variação gradual indicada pela soma pode ser assegurada, o que provê ao método imunidade à variações súbitas devido a ruídos.

Em síntese, uma FAI será detectada pela metodologia proposta se todos os contadores apresentarem valores superiores aos seus respectivos limiares. Se ao menos um deles não satisfazer as condições, a FAI não é detectada. Deste modo, o Algoritmo 1 representa o processo de atualização e a forma em que é realizada a detecção de FAIs por meio da metodologia proposta neste capítulo.

Algoritmo 1 Confirmação da detecção de uma FAI por meio dos contadores do Algoritmo I.

```

 $c^I \leftarrow 0, c^{II} \leftarrow 0, c^{III} \leftarrow 0, c^{IV} \leftarrow 0, c^V \leftarrow 0$ 
enquanto não for uma FAI faça
  se  $\Theta^1 \geq \gamma^1$  então
     $c^I \leftarrow c^I + 1$ 
  senão
     $c^I \leftarrow \max(c^I - 1, 0)$ 
  fim se
  se  $\Theta^2 \geq \gamma^2$  e  $(\Theta^4 \geq \gamma^4$  ou  $\Theta^6 \geq \gamma^6)$  então
     $c^{II} \leftarrow c^{II} + 1$ 
  senão
     $c^{II} \leftarrow \max(c^{II} - 1, 0)$ 
  fim se
  se  $\Theta^3 \geq \gamma^3$  então
     $c^{III} \leftarrow c^{III} + 1$ 
  senão
     $c^{III} \leftarrow \max(c^{III} - 1, 0)$ 
  fim se
  se  $\Theta^5 \geq \gamma^5$  ou  $\Theta^7 \geq \gamma^7$  então
     $c^{IV} \leftarrow c^{IV} + 1$ 
  senão
     $c^{IV} \leftarrow \max(c^{IV} - 1, 0)$ 
  fim se
  se  $\Theta^{soma} \geq \gamma^{soma}$  então
     $c^V \leftarrow c^V + 1$ 
  senão
     $c^V \leftarrow 0$ 
  fim se
  se  $(c^I > 9$  e  $c^{II} > 9$  e  $c^{III} > 9$  e  $c^{IV} > 9$  e  $c^V > 0,5 \cdot c^I)$  então
    é uma FAI
  fim se
fim enquanto

```

5.2 TESTES E RESULTADOS

O método foi testado com os sinais de FAIs e os eventos descritos no Capítulo 3 utilizando o sistema do IEEE de 34 barras (IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, 2010), com todas as medições realizadas na barra da subestação (barra 800), com a taxa de 128 amostras por ciclo.

Como o nível de ruídos comuns em SDs tem RSR em torno de 48 a 70 dB (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010; TOMIC; KUSLJEVIC; VUJICIC, 2007), os testes foram realizados com a adição de ruído com uma RSR de 40, 50 e 60 dB.

5.2.1 Análise do Método na Detecção de FAIs

Para habilitar o método de detecção, os valores de β , α , e γ devem ser previamente definidos. Em relação aos testes que seguem, estes parâmetros foram determinados baseados na aplicação de um sinal de FAI na barra mais distante da subestação com o nível mais alto de ruído testado, neste caso com RSR de 40 dB. Uma vez que a constante δ habilita a atualização do limiar, δ deve apresentar um valor baixo, o que significa que deve haver baixa variação quando o sistema está em regime permanente, mas não poderá ser 0 devido ao ruído. Sendo assim, o valor de δ foi inicializado em 0 e foi verificada a atualização do limiar, que deverá ocorrer apenas em regime permanente, aumentando seu valor em 0,001 a cada teste. No sistema avaliado, o δ em que o limiar se comportou adequadamente foi em 0,005. Já α é definido como o fator de saturação, cujo objetivo é mitigar variações muito bruscas nos limiares. Assim, α foi inicializado em 1 (que corresponde a manutenção do limiar no ciclo anterior) e foi incrementado em 0,1% a cada teste para avaliar qual o valor máximo que o limiar poderia atingir. O valor de α satisfatório encontrado foi igual a 1,05.

De acordo com a análise realizada no Apêndice A, durante uma FAI, há uma alta variação de energia entre ciclos consecutivos nas harmônicas de baixa ordem. Neste estudo, foram realizadas análises que determinaram que esta variação pode ser dezenas de vezes maior em relação ao regime permanente. Ainda, as análises apresentadas no Apêndice A mostram que é necessário definir diferentes valores para β de acordo com o nível de variação de energia de cada ordem harmônica (veja a Figura 30 e a Figura 31). Deste modo, o maior valor, β^a , foi definido para a 3ª ordem harmônica, seguido de β^b que determina o valor para a 2ª ordem harmônica e para a fundamental. Além desses, o menor valor, β^c foi estabelecido para as harmônicas de 4ª a 7ª ordem. Nos testes para serem definidos estes valores, os fatores β foram inicializados em 10 e a medida para determinar quais seriam maiores foi realizada por meio da análise apresentada no Apêndice A, que mostra em quais harmônicas houve maior variação de energia. Por fim, o valor de β^{soma} foi definido, que deve ser menor que os parâmetros anteriores, porque avalia a soma de nove ciclos da variação. Desta forma, seu valor pode ser um pouco maior que 1, pois apenas variações consideráveis no sinal podem alterá-lo. Os valores dos parâmetros definidos para este

sistema são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros do Algoritmo I.

Parâmetros	Ordens Harmônicas	Valor
δ	-	0,005
β^a	3 ^a	50
β^b	1 ^a e 2 ^a	20
β^c	4 ^a , 5 ^a , 6 ^a e 7 ^a	10
β^{soma}	-	1,5
α	-	1,05

Fonte: Elaborada pela autora.

5.2.1.1 Análise das FAIs na Barra 802

Após definidos os limiares, os testes puderam ser realizados. De início, foi avaliado o comportamento do Algoritmo I em relação às FAIs. Desse modo, com o intuito de apresentar o comportamento de algumas das variáveis da técnica proposta quando a FAI incide próxima ao ponto de medição, foi elaborada a Figura 15. Observa-se que esta figura apresenta um exemplo do funcionamento da variação da componente fundamental θ^1 e da variável da soma θ^{soma} e seus limiares γ^1 e γ^{soma} para uma forma de onda de FAI no solo de areia aplicada na barra 802. A Figura 15a apresenta a corrente da fase A medida na subestação que contém ruído com um SNR de 40 dB. Neste caso, o condutor rompe em 0,5 s e entra em contato com um solo arenoso em 1 s, quando é iniciada a ignição do arco. O tempo de detecção também é ilustrado, sendo igual a 9 ciclos após o toque do condutor ao solo. Nesta proposição, a detecção não implica em abertura do circuito, mas sim como uma indicação de FAI.

Já a Figura 15b apresenta a variação de energia entre duas janelas consecutivas Θ^1 e o limiar γ^1 para a frequência fundamental. A variação de energia aumenta quando o condutor se rompe a 0,5 s. É importante destacar que durante o período em que a corrente de falta é nula (0,5 a 1 s), há uma pequena variação de energia causada pelo ruído. No entanto, esta variação não é detectada devido ao uso dos parâmetros β . Por fim, a Figura 15c mostra a variação da soma de nove ciclos Θ^{soma} e seu limiar γ^{soma} . Nota-se que o limiar se adapta ao longo do tempo, mas não de forma brusca devido ao fator α . A variável Θ^{soma} se modifica de forma mais suave que Θ^1 ao longo do tempo, e não apresenta modificações acentuadas. Ademais, constata-se que mesmo que θ^{soma} seja maior que seu limiar após 0,5 s, θ^1 não excede seu limiar por um número mínimo de ciclos para caracterizar a detecção da FAI. Após 1 s, quando a FAI incide no sistema, ambos os valores de θ^{soma} e θ^1 aumentam e sustentam esses altos valores, que, juntamente com as outras harmônicas, implicam na detecção de FAIs. Na seção 5.3 é analisado o comportamento dos contadores durante este caso de FAI apresentado.

Figura 15 – Detecção de FAI com a RSR de 40 dB na barra 802 apresentando a (a) corrente na subestação, (b) o limiar e a variação entre ciclos consecutivos da frequência fundamental, e (c) o limiar e a variação da soma de nove ciclos.

Fonte: Elaborada pela autora.

5.2.1.2 Análise de FAIs na Barra 848

Esta subsecção foi elaborada com o intuito de apresentar o comportamento de algumas das variáveis do método quando a FAI incide distante do ponto de medição. A Figura 16a mostra a corrente medida na subestação, com uma RSR de 40 dB, para uma FAI aplicada na barra 848, que está distante da subestação. A corrente de falta da FAI é a mesma apresentada na Figura 15, causada pelo contato do condutor com um solo arenoso. Na condição de regime permanente (0 a 0,5 s), o limiar é atualizado marginalmente, observa-se que é utilizada uma escala logarítmica. Os instantes de ruptura do condutor e de incidência da FAI foram em 0,5 s e 1 s, respectivamente. Nota-se que a corrente registrada na subestação durante a FAI é muito semelhante à corrente de regime permanente, apresentando dificuldades para a identificação da FAI por inspeção visual. No entanto, as Figuras 16b e 16c revelam que os índices aplicados no método de detectam a perturbação em tempo hábil. Neste caso, em 0,5 s, os índices de variação de energia aumentam, porém seus valores altos não permanecem o suficiente para confirmar os 9 ciclos exigidos pelo método. Desta maneira, a identificação da FAI ocorre somente quando o arco elétrico é iniciado, após 1 s, que é o período desejado para a detecção.

5.2.1.3 Testes extensivos

Devido à natureza aleatória do ruído adicionado ao sinal, para cada valor de RSR analisado, foram realizadas 100 simulações para cada um dos casos de FAIs aplicados nas barras do sistema teste, considerando faltas junto aos barramentos do sistema. Portanto, a taxa de detecção e o tempo médio de detecção e seu desvio padrão para todos os testes são apresentados

Figura 16 – Detecção de FAI com a RSR de 40 dB na barra 848 apresentando a (a) corrente na subestação, (b) o limiar e a variação entre ciclos consecutivos da frequência fundamental, e (c) o limiar e a variação da soma de nove ciclos.

Fonte: Elaborada pela autora.

na Tabela 4. Os resultados mostram que a taxa de detecção diminui quando o ruído aumenta, porém, mesmo na pior condição de ruído (40 dB), a precisão é superior a 90%. Quanto ao tempo para identificação das FAIs, destaca-se que, no Brasil, de acordo com Lima *et al.* (2018b), as FAIs geralmente são detectados após a reclamação do cliente, o que pode levar várias horas. Neste sentido, o tempo de detecção alcançado nesta proposição é uma grande contribuição.

Tabela 4 – Porcentagem de taxa de detecção, tempo médio de detecção e seu desvio padrão em relação ao Algoritmo I com ruídos com RSR de 60, 50 e 40 dB.

RSR	Taxa de detecção	Tempo médio de detecção	Desvio padrão do tempo de detecção
60 dB	95,8%	0,3 s	0,34
50 dB	94,4%	0,5 s	0,35
40 dB	90,7%	0,5 s	0,41

Algumas proposições de detecção de FAIs baseadas na TS usualmente testam seus métodos em sistemas de distribuição simples, de 2 a 7 barras (SAMANTARAY; PANIGRAHI; DASH, 2008; ROUTRAY; MISHRA; ROUT, 2015; KAR; SAMANTARAY, 2014) ou consideram a incidência das FAIs em um único local (LIMA *et al.*, 2018a). Com a finalidade de investigar a influência da FAI nesta proposição, foi elaborada a Figura 17 que mostra a taxa de detecção de FAIs por este método considerando as 4, 8, 12, 16 e 23 barras mais próximas à subestação. Para fazer isso, as barras do sistema foram organizadas de acordo com sua distância elétrica em relação à barra da subestação. Por meio da Figura 17, observa-se que quanto mais próximas as FAIs da subestação, melhor é o desempenho do método. No entanto, mesmo no pior caso testado,

a taxa de detecção alcançou uma taxa maior que 90% para todos os ruídos, confirmando o limite de aplicação e a efetividade do algoritmo apresentado.

Figura 17 – Taxa de detecção das FAIs considerando as 4, 8, 12, 16 e 23 barras mais próximas do ponto de medição com diferentes níveis de ruídos adicionados ao sinal.

Fonte: Elaborada pela autora.

5.2.2 Análise do método em relação a falsas operações

Nesta seção são apresentados os testes com eventos com características que podem ser confundidas com FAIs, com o objetivo de avaliar a robustez do método. As análises seguiram a metodologia apresentada no Capítulo 3, com o mesmo código e valor dos parâmetros utilizado na avaliação da FAI apresentados previamente na Tabela 3. Para simular estes eventos, ruídos com uma RSR de 40, 50 e 60 dB também foram adicionados aos sinais registrados na subestação. Devido à natureza aleatória do ruído, 100 simulações foram realizadas para cada nível. Deste modo, os eventos simulados foram:

- Chaveamento de Ramal Lateral;
- Chaveamento de Banco de Capacitor;
- Chaveamento de Carga Linear;
- Chaveamento de Carga Não Linear - Retificador;
 - O retificador foi conectado à barra 854.

Os resultados indicaram que não houve identificação de nenhum desses fenômenos pelos métodos, mesmo com a adição de ruídos. Isto demonstra a robustez do Algoritmo I dentro dos testes propostos.

Para exemplificar o comportamento da variação de energia da componente fundamental θ^1 e da soma θ^{soma} e seus respectivos limiares γ^1 e γ^{soma} durante o chaveamento de um ramal lateral com a adição de ruído com uma RSR de 40 dB, foi elaborada a Figura 18. Observa-se que em 1 s, quando o ramal entre as barras 808 e 810 é conectado ao sistema, há um transitório na forma de onda da corrente registrada na subestação. Por meio da Figura 18b vê-se que nesse instante há um aumento da variação da energia da fundamental θ^1 acima de seu limiar γ^1 . No entanto, como este é um transitório não duradouro, a variação de energia é minimizada rapidamente aos valores de regime permanente, no qual as variações de energia são causadas somente pelo ruído. Já pela Figura 18c constata-se que a variação da soma θ^{soma} , por considerar a soma ao longo do nove ciclos, ultrapassa seu limiar γ^{soma} por um maior período de tempo. No entanto, isto não é um problema, pois a detecção somente é efetivada quando há identificação da FAI por todas as variáveis. Deve-se salientar que a variação da soma θ^{soma} é utilizada no algoritmo para proteger de falsas detecções por ruído. A interpretação desta análise para a conexão de um ramo do sistema pode ser estendida aos outros fenômenos analisados neste capítulo que apresentam comportamento similar. Ainda, pode-se comparar as variáveis do Algoritmo I apresentados na Figura 18 para o ramal lateral, com as mesmas variáveis durante FAIs previamente apresentadas nas Figuras 15 e 16, nas quais as variáveis das variações de energia permaneceram por um longo período acima de seus limiares.

Figura 18 – Representação da (a) corrente na subestação, (b) o limiar e a variação entre ciclos consecutivos da frequência fundamental, e (c) o limiar e a variação da soma de nove ciclos durante o chaveamento de um ramal lateral com a adição de 40 dB de ruído.

Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, na próxima seção será evidenciado o comportamento dos contadores do método para o chaveamento de um Ramal Lateral, teste que pode ser estendido para compreensão das análises dos outros eventos mencionados.

5.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CONTADORES

Nesta seção são analisados os comportamentos dos contadores do método, com o intuito de expor o modo de funcionamento desta proposição. A Figura 19 ilustra o comportamento dos contadores para um caso de FAI na barra 802 no solo arenoso, previamente apresentado na Figura 15 e o chaveamento de um RL conectado à barra 816, que inclui as barras 818, 820 e 822. Verifica-se que, na Figura 19a, quando o condutor se rompe em 0,5 s, há um aumento nos valores de todos os contadores, mas não o suficiente para indicar uma detecção. Em 1 s, quando o arco é iniciado, isto é, a FAI propriamente dita, os contadores aumentam até que a FAI seja detectada. Em contraste, a Figura 19b revela o comportamento dos contadores quando acontece a energização de um ramal lateral (em 1 s de simulação). Neste caso, mesmo que os valores dos contadores aumentem devido às variações harmônicas induzidas por este chaveamento, houve diminuição poucos ciclos depois, uma vez que este transitório não se repete ao longo do tempo.

Portanto, embora outros eventos que não são FAIs causem alterações nas frequências dos sinais registrados na subestação, os transitórios desapareceram poucos ciclos após a incidência. À vista disto, não há detecção pelo método porque eles não permanecem durante 9 ciclos. Ademais, como os contadores estão relacionados a diferentes ordens harmônicas, mesmo que um evento transitório cause um aumento em algumas delas, a necessidade de atender simultaneamente a todos os seus requisitos implica na não detecção.

Figura 19 – Comportamento dos contadores durante uma (a) FAI e um (b) Chaveamento de Ramal Lateral.

Fonte: Elaborada pela autora.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foi proposto um novo método de detecção de FAIs baseado na TS. Uma das novidades do método é a consideração do tempo de queda do condutor, pois isso impõe que a detecção deve ocorrer apenas quando a FAI realmente se inicia, ou seja, após o toque do condutor ao solo. Além disto, um limiar adaptativo foi desenvolvido para aumentar a aplicabilidade do método.

Salienta-se que os sinais de FAIs utilizados nos testes deste algoritmo foram obtidos de medições reais em campo, representando todas as características de FAIs mencionadas na literatura da área. É importante destacar que os testes foram conduzidos aplicando as FAIs em diversos barramentos do sistema de teste e a detecção foi realizada usando apenas a corrente da subestação.

O método proposto apresentou uma precisão maior que 90% para o caso com RSR igual a 40 dB e em torno de 95% para 50 e 60 dB. No caso de FAIs próximas à subestação, a metodologia apresentou uma precisão ainda maior. Para avaliar a robustez do método contra falsos positivos, foram realizados testes incluindo o chaveamento de BC, CNL, CL e RL no sistema. Para esses casos, mesmo com ruído adicionado à corrente da subestação, não houve detecção.

Em geral, pode-se concluir que esta primeira abordagem proposta é uma técnica promissora, comprovando a eficácia da variação de energia dos harmônicos da TS para a detecção de FAIs, independentemente da localização da falta e da ocorrência de outros transientes da rede.

PROPOSTA DO ALGORITMO II

Nas análises e testes realizados no Algoritmo I proposto do Capítulo 5, foram identificadas algumas motivações da não detecção de alguns casos de FAIs. A primeira razão para tal é a influência do ruído, dado que a taxa de detecção diminuiu ao aumentar a RSR. A segunda causa é a dificuldade de identificar FAIs que incidem em barras distantes do ponto de medição. Esta justificativa foi comprovada ao mostrar que, ao diminuir o número de barras consideradas, a taxa de acerto aumentou.

Pautado no exposto, foi desenvolvida a segunda técnica proposta nesta dissertação. Ao elaborar este método, o objetivo principal fora aumentar o número e variedade dos testes de robustez, bem como elevar a taxa de detecção do método, mesmo com adição de ruído nos sinais. Isto posto, apresenta-se o Algoritmo II, o qual é pautado na variação da energia das harmônicas de baixa ordem extraídas pela TS do sinal de corrente do neutro do transformador medido na subestação. De modo geral, as principais semelhanças entre o Algoritmo II e o Algoritmo I (apresentado no Capítulo 5) são:

- Método baseado na TS;
- Detecção de FAIs em todo o sistema com medições apenas na subestação;
- Uso de um limiar auto-adaptativo;
- A adição de ruídos aos sinais;
- Testes considerando a distinção de FAIs de outros eventos em SDs de média tensão;
- Utilização de dados reais de FAIs.

Por outro lado, este segundo método apresenta melhorias notáveis em relação ao primeiro método, que são:

- A diminuição da quantidade de parâmetros a serem previamente estipulados. No primeiro algoritmo eram necessários 6 valores, e neste somente 2.
- A diminuição da complexidade do método, com menor número etapas para atualização do limiar e do algoritmo de detecção, bem como quantidade inferior de variáveis no algoritmo;
- Aplicação de ruídos com RSR de 30, 40 e 50 dB, o que implica em maior complexidade para detecção;
- O teste de distinção com a adição de três eventos passíveis de serem confundidos com a FAI além dos realizados no Algoritmo I: o afundamento e elevação de tensão, a Energização de Transformador e, como carga não linear, além do retificador, a Energização de Forno a Arco. Isso implica em uma maior gama de aplicabilidade do método.

Em vista do exposto, percebe-se, ainda, que todas estas melhorias em relação ao Algoritmo I, também são avanços relacionados aos outros métodos de detecção de FAIs expostos ao longo deste trabalho.

Enfim, nas próximas seções a metodologia proposta será explicada detalhadamente, bem como serão apresentados os resultados alcançados com os testes realizados neste algoritmo.

6.1 METODOLOGIA PROPOSTA

Como mencionado previamente, o arco elétrico formado durante a FAI implica em distorções da forma de onda das grandezas associadas. Deste modo, harmônicos de baixa ordem podem ser utilizados para caracterizar este tipo de evento.

Ao avaliar os resultados do Algoritmo I, foi observado que, ao aplicar FAIs em barras mais distantes do ponto de medição, houve diminuição da taxa de acerto. Isto posto, com o objetivo de aumentar a detecção, nesta proposição é realizada uma nova concepção: a utilização da corrente do neutro do transformador da subestação como sinal de entrada para o método. Salienta-se que não foi utilizada a corrente residual (soma das correntes das 3 fases) como no trabalho de Soheili, Sadeh e Bakhshi (2018) pois, no futuro, para aplicações reais, poderiam ser ampliados os erros de medição advindos do uso de transformadores de corrente. Destaca-se também que não é utilizada a configuração de neutro multi-aterrado, mas sim o aterramento sólido apenas do neutro na subestação.

Assim, com o intuito de exemplificar o comportamento da corrente medida no neutro do transformador e mostrar que é facilitada a identificação da FAI, foi elaborada a Figura 20. A Figura 20a ilustra a corrente medida no neutro do transformador da subestação com uma FAI em solo de areia incidindo na barra 802, a mais próxima da subestação, aproximadamente a 2Ω de

distância elétrica. Já a Figura 20a, mostra para o mesmo sinal de FAI, a corrente registrada com a incidência na barra 888, que é a barra mais distante da subestação, com $71,5\Omega$ de distância elétrica do ponto de medição. Nota-se que, durante o regime permanente (0 a 0,5 s) a corrente do neutro é próxima a 5 A, devido ao desbalanço natural deste sistema. Por inspeção, constata-se que, ao incidir a FAI, quer seja na barra 802 ou 888, é identificada uma grande variação neste sinal, contendo as características apontadas na literatura da área, as quais são geradas devido ao arco elétrico, como a modulação, aleatoriedade, assimetria e longa duração.

A outra novidade na proposta do Algoritmo II é a utilização da ideia observada no Capítulo 4 para distinção entre FAIs e outros eventos comuns em um SDMT que apresentam variação harmônica ao longo do tempo, isto é, são de longa duração. Tal conceito é pautado na análise das correntes das fases, avaliando se há variação harmônica em mais de uma das fases ao longo do tempo, partindo do princípio que dificilmente uma FAI ocorreria em mais de uma fase simultaneamente.

A partir da premissa abordada, foi então elaborado o método geral seguido neste algoritmo. A primeira parte é baseada nas medições na subestação das correntes das fases e do neutro. Posteriormente, estes sinais são filtrados para que assim possa ser calculada a TS. Em seguida, é analisada a variação da energia das frequências deste sinal para que seja iniciada a etapa de verificação do limiar. Se não for identificado um transitório, o limiar será atualizado. Se um transitório for apontado, será analisada se esta variação é sinalizada em mais de uma das fases do sistema. Caso isto seja verificado, não é configurada uma FAI. Por outro lado, será realizada a confirmação da falta, e assim registrado o instante da detecção. O fluxograma ilustrado na Figura 21 resume todos os processos propostos para detecção de FAIs por este método.

6.1.1 Filtragem da corrente de neutro e extração das características

Normalmente, sinais registrados em sistemas elétricos apresentam ruídos associados (TOMIC; KUSLJEVIC; VUJICIC, 2007). Para evitar os impactos negativos do ruído, o método proposto aplica uma técnica de filtragem usando um filtro *Butterworth* passa-baixa com uma frequência de corte de 420 Hz. Somente frequências de sinal de até 300 Hz (5ª ordem harmônica) são consideradas neste método, pois são as mais relevantes na variação de energia durante as FAIs, como mostra a análise do Apêndice A. A próxima fase consiste no cálculo da TS a cada janela de 1 ciclo dos sinais se deslocando a cada ciclo. Então, para cada janela, a TS gera uma matriz de resposta com amplitude e fase, na qual as linhas representam as ordens harmônicas, e as colunas indicam as amostras dentro da janela. Portanto, a cada matriz S obtida a cada janela w , o método calcula o espectro de energia ε para a amplitude de cada ordem harmônica h da primeira amostra k_1 até a última k_2 de acordo com o Teorema de Parseval (LATHI; GREEN,

Figura 20 – Corrente medida no neutro com uma FAI na barra (a) 802 e (b) 890.

Fonte: Elaborada pela autora.

2005), como mostra a Equação (6.1).

$$\epsilon_w^h = \sum_{k=k_1}^{k_2} |S[h, k]|^2 \quad (6.1)$$

Após o cálculo da energia, é criada a Matriz de Energia da Transformada de Stockwell

quando é calculada a TS e posteriormente a energia de nova janela do sinal, consequentemente gerando uma nova janela de variação de energia, a matriz M^N é atualizada.

$$M_{5 \times 3}^N = \begin{bmatrix} \Theta_1^1 & \Theta_2^1 & \Theta_3^1 \\ \Theta_1^2 & \Theta_2^2 & \Theta_3^2 \\ \Theta_1^3 & \Theta_2^3 & \Theta_3^3 \\ \Theta_1^4 & \Theta_2^4 & \Theta_3^4 \\ \Theta_1^5 & \Theta_2^5 & \Theta_3^5 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Nota-se, por outro lado, que as correntes das fases são utilizadas para distinção de outros eventos, e para tal, a variação considerada será somente da segunda ordem harmônica. Então, a matriz de variações para as fases M^F , para h igual a 2, nos três ciclos mais recentes, será calculada de acordo com a Equação (6.5).

$$M_{1 \times 3}^F = \begin{bmatrix} \Theta_1^2 & \Theta_2^2 & \Theta_3^2 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

6.1.3 Limiar Adaptativo

Neste método, o limiar é adaptado se não houver identificação de um transitório no sistema. Para detectar se há transitório, o método observa se há um aumento da variação da energia da componente fundamental da corrente de neutro do ciclo atual em relação à variação registrada há dois ciclos, como representa a Equação (6.6).

$$\theta_{(k)}^1 \leq \theta_{(k-2)}^1 \quad (6.6)$$

Se a relação da Equação (6.6) não for verdadeira, isto é, há um transitório, o limiar receberá seu valor anterior. Caso a condição seja satisfeita indicando regime permanente, o limiar γ , para cada ordem harmônica h , será calculado em seu ciclo k de acordo com a Equação (6.7). Logo, γ assumirá, para cada ordem harmônica h , o menor valor entre seu valor no ciclo anterior multiplicado por fator de saturação α (a única variável a ser determinada nesta proposição) e a média entre a variação de energia dos três ciclos mais recentes (que é o valor com que o limiar γ se inicia).

$$\gamma_{(k)}^h = \min \left(\alpha \cdot \gamma_{(k-1)}^h, \frac{\sum_{x=0}^2 \Theta_{(k-x)}^h}{3} \right) :: h = 1, 2, \dots, 5. \quad (6.7)$$

Destaca-se que o fator de saturação α é definido em dois valores globais: um para as harmônicas pares e outro para as harmônicas ímpares. O fator de saturação foi criado para impedir variações bruscas no limiar.

Salienta-se, ainda, que para o sinal do neutro, será calculado um limiar para cada ordem harmônica, de 2ª a 5ª ordem. Já para os sinais da fase, o limiar será calculado do mesmo

modo apresentado na Equação (6.7), porém será necessário somente realizá-lo para a 2ª ordem harmônica.

6.1.4 Algoritmo de detecção

Ao definir os valores dos limiares, pode-se então avaliar a identificação da FAI. Deste modo, a detecção proposta é basicamente realizada pelas harmônicas de 2ª a 5ª ordem. Então, se a variação de cada uma dessas harmônicas for maior que seus respectivos limiares, incrementa-se seu respectivo contador, senão, decrementa-se em 1, sendo que nunca são negativos. O contador para detecção, baseado na corrente do neutro, para a 2ª ordem harmônica é denominado Cn^I , para a 3ª ordem é chamado Cn^{II} , o contador da 4ª ordem harmônica é nomeado Cn^{III} , e, por fim, o contador da 5ª harmônica é chamado Cn^{IV} .

Fonte: Elaborada pela autora.

Neste método, que está descrito nos processos do Algoritmo 2, são utilizadas duas técnicas para assegurar a distinção de outros eventos. A primeira técnica foi criada para distinguir FAIs de transitórios de curta duração, como o chaveamento de CL, RL, BC e o afundamento e elevação de tensão. Para tal, assim como no método anterior, esta nova proposição utiliza nove variações de energia para confirmação da falta, visto que estes nove ciclos (150 ms) de espera são aplicados com o intuito de aguardar a operação dos dispositivos de proteção convencionais caso um transitório com corrente suficiente para ser detectado ocorra, como é o caso de faltas com baixa impedância. Destaca-se que normalmente a proteção principal em um SDMT opera em tempo menor que os 150 ms mencionados (SANTOS *et al.*, 2017).

Adicionalmente, a segunda técnica de distinção proposta neste algoritmo foi elaborada com o intuito de complementar a primeira, distinguindo também transitórios de longa duração das FAIs. Tal metodologia é pautada na proposta mencionada no Capítulo 4, que sugere que é possível distinguir FAIs de alguns eventos comuns em sistemas elétricos, como ET e o chaveamento de cargas não lineares como a EFA, por meio de uma solução: verificar se há a detecção de um evento com variação harmônica nas três fases do sistema. Para tal, neste trabalho é proposta comparação da variação de energia da 2ª harmônica das correntes de cada uma das fases do sistema, representadas por θ_a^2 , θ_b^2 e θ_c^2 , em relação a seus respectivos limiares γ_a^2 , γ_b^2 e γ_c^2 . Se a variação da segunda ordem harmônica for maior que seu limiar, para cada uma das três fases, seus respectivos contadores são incrementados. Se a condição não for satisfeita, estes são decrementados, sendo que nunca são menores que 0. Caso o contador de mais de uma das três fases indicar valor maior que 9, é estabelecido então que este não é um evento monofásico, e a variável η assumirá valor unitário, o que implica na exclusão da possibilidade de uma FAI. Caso contrário, a variável η permanecerá com valor nulo, o qual esta deverá ser iniciada. Neste caso, os contadores da segunda harmônica para as fases A, B e C recebem o nome de Ca , Cb , e Cc , respectivamente.

Algoritmo 2 Confirmação da detecção de uma FAI por meio dos contadores do Algoritmo II.

$C_n^I \leftarrow 0, C_n^{II} \leftarrow 0, C_n^{III} \leftarrow 0, C_n^{IV} \leftarrow 0, C_a \leftarrow 0, C_b \leftarrow 0, C_c \leftarrow 0, \eta \leftarrow 0$

enquanto não for uma FAI **faça**

se $\Theta_n^2 \geq \gamma_n^2$ **então**

$C_n^I \leftarrow C_n^I + 1$

senão

$C_n^I \leftarrow \max(C_n^I - 1, 0)$

fim se

se $\Theta_n^3 \geq \gamma_n^3$ **então**

$C_n^{II} \leftarrow C_n^{II} + 1$

senão

$C_n^{II} \leftarrow \max(C_n^{II} - 1, 0)$

fim se

se $\Theta_n^4 \geq \gamma_n^4$ **então**

$C_n^{III} \leftarrow C_n^{III} + 1$

senão

$C_n^{III} \leftarrow \max(C_n^{III} - 1, 0)$

fim se

se $\Theta_n^5 \geq \gamma_n^5$ **então**

$C_n^{IV} \leftarrow C_n^{IV} + 1$

senão

$C_n^{IV} \leftarrow \max(C_n^{IV} - 1, 0)$

fim se

se $\Theta_a^2 \geq \gamma_a^2$ **então**

$C_a \leftarrow C_a + 1$

senão

$C_a \leftarrow \max(C_a - 1, 0)$

fim se

se $\Theta_b^2 \geq \gamma_b^2$ **então**

$C_b \leftarrow C_b + 1$

senão

$C_b \leftarrow \max(C_b - 1, 0)$

fim se

se $\Theta_c^2 \geq \gamma_c^2$ **então**

$C_c \leftarrow C_c + 1$

senão

$C_c \leftarrow \max(C_c - 1, 0)$

fim se

se mais de um dos contadores das fases (C_a, C_b, C_c) > 9 **então**

$\eta \leftarrow 1$

senão

$\eta \leftarrow 0$

fim se

se ($C_n^I > 9$ e $C_n^{II} > 9$ e $C_n^{III} > 9$ e $C_n^{IV} > 9$ e $\eta = 0$) **então**

 FAI detectada

fim se

fim enquanto

Por conseguinte, se os quatro contadores do neutro (C_n^I , C_n^{II} , C_n^{III} e C_n^{IV}) apresentarem valores maiores que nove, e não houver indicação que o evento ocorreu nas três fases do sistema ($\eta = 0$), é sinalizada a detecção da FAI. Todo este processo de detecção é demonstrado no Algoritmo 2.

É importante mencionar que a detecção da FAI nesta proposta não implica em desconexão (abertura) do circuito, e sim em uma sinalização da ocorrência da FAI.

6.2 TESTES E RESULTADOS

Todos os testes realizados nesta seção foram elaborados de acordo com os procedimentos apresentados no Capítulo 3, utilizando o sistema teste do IEEE de 34 barras. Foram registrados os sinais de corrente do neutro do transformador da subestação, além das correntes das fases do sistema.

Como o nível de ruídos comuns em um SDMT tem RSR em torno de 48 a 70 dB (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010; TOMIC; KUSLJEVIC; VUJICIC, 2007) e este método foi elaborado com o intuito de mostrar a imunidade da técnica a ruídos, os testes foram realizados com a adição de ruídos com RSR de 30, 40 e 50 dB.

6.2.1 Avaliação do método para detecção de FAIs

Como mencionado anteriormente, este método necessita de uma variável a ser estabelecida: o fator de saturação α , que impede que o limiar adaptativo varie bruscamente devido ao ruído. Propõe-se o uso de dois valores de α , um para os harmônicos ímpares e outro para os pares. Para parametrizá-los, foi utilizado o método de aplicar a FAI na barra mais distante da subestação com a adição do ruído com RSR de 30 dB. Inicialmente, os valores de α foram inicializados em 1. Desse modo, o valor dos fatores de saturação foram incrementados em 0,01% a cada teste e a atualização do limiar durante o regime permanente foi acompanhada. Como resultado, foi conquistada a detecção da FAI com a correta atualização do limiar com α variando entre 1,02 e 1,05 para as harmônicas ímpares e entre 1,001 e 1,005 para as ordens pares para o sistema testado. Nos resultados apresentados nesta seção, o α foi determinado em 1,02 para as ordens ímpares e 1,001 para as pares.

Com o intuito de inicializar a análise de resultados, a Figura 22 foi elaborada para ilustrar o comportamento da variação das harmônicas extraídas pela TS e seus respectivos limiares durante uma FAI. Por meio da Figura 22, evidencia-se o comportamento de cada ordem harmônica com a incidência de uma FAI em solo de areia na barra 802 com a adição de 30 dB de ruído aos sinais. A detecção neste caso ocorreu em 0,62 segundos, isto é, 0,12 segundos após o início da FAI. Nota-se que a variação de energia de todas as harmônicas foi bastante considerável, o que demonstra a efetividade de tais métricas.

Figura 22 – Comportamento da variação e dos limiares da (a) 2ª, (b) 3ª, (c) 4ª e (d) 5ª ordens harmônicas da corrente do neutro durante uma FAI com a adição de 30 dB de ruído.

Fonte: Elaborada pela autora.

Isto posto, também foi elaborada a Figura 23 com o objetivo de apresentar o funcionamento dos contadores da técnica em um caso aplicado, o mesmo caso de FAI da Figura 22, com o toque do condutor em solo de areia com a adição de ruído com 30 dB no sinal. A Figura 23 mostra o comportamento dos quatro contadores da corrente do neutro, que correspondem às harmônicas de 2ª a 5ª ordem. Verifica-se que a partir do início da falta estes índices foram incrementados e, associados, indicaram a detecção da falta em 0,62 segundos.

Por fim, a Figura 24 mostra o comportamento dos contadores das correntes das fases no mesmo caso de FAI previamente exposto. Como eles não indicaram a detecção da falta, e os contadores da corrente de neutro apresentaram valor acima de 9, pôde-se completar o processo de detecção da FAI. Destaca-se que se tivessem sido utilizados os contadores das fases para detectar a FAI, neste caso não haveria detecção, o que mostra que a corrente do neutro é uma boa ferramenta, como visto anteriormente na Figura 23. Constata-se ainda que os momentos em que esses contadores são incrementados em 1 e posteriormente decrementados, são causados pelo ruído de alto impacto adicionado ao sinal.

Figura 23 – Comportamento dos contadores do método (a) C_n^I , (b) C_n^{II} , (c) C_n^{III} e (d) C_n^{IV} durante uma FAI com adição de ruído de 30 dB.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 24 – Comportamento dos contadores do método em relação às fases A, B e C, representados por C_a , C_b e C_c , durante uma FAI com adição de ruído de 30 dB.

Fonte: Elaborada pela autora.

Após serem realizadas 10 vezes todos os 1089 casos de FAIs para cada um dos três níveis de ruído, considerando os 33 tipos de solos com as FAIs incidindo nas 33 barras do sistema (pois a subestação não foi considerada), foi obtida a média da taxa de detecção e do tempo de identificação com seu respectivo desvio padrão. Os resultados alcançados para cada nível de ruído avaliado estão apresentados na Tabela 5. Vê-se que estes resultados são satisfatórios, o que mostra a aplicabilidade do método neste sistema.

Tabela 5 – Porcentagem de detecção, tempo médio de detecção e seu desvio padrão em relação ao Algoritmo II com a adição de ruídos com RSR de 50, 40 e 30 dB.

RSR	Taxa de detecção	Tempo médio de detecção	Desvio padrão do tempo de detecção
50 dB	100%	0,51 s	0,88
40 dB	100%	0,47 s	0,79
30 dB	100%	0,37 s	0,64

Fonte: Elaborada pela autora.

6.2.2 Avaliação da distinção de outros eventos

Como mencionado anteriormente, os métodos de detecção de FAIs devem ser avaliados em relação a outros transitórios comuns em em redes de distribuição de energia elétrica. Neste caso, a robustez do Algoritmo II foi testada em relação aos seguintes eventos:

- Chaveamento de Banco de Capacitor;
- Chaveamento de Carga Linear;
- Chaveamento de Ramal Lateral;
- Chaveamento de Carga Não Linear - retificador;
- O retificador foi conectado nas barras 808, 848 e 854.
- Chaveamento de Carga Não Linear - forno a arco;
- Energização de Transformador;
- Afundamento e Elevação de Tensão.

Nota-se que a diversidade dos casos testados está além daqueles observados nos trabalhos mencionados na bibliografia apresentada no Capítulo 2, principalmente no tocante às cargas não lineares e a energização de transformador.

Os resultados mostraram que, em todos os casos testados, independentemente no nível de ruído, não houve detecção destes eventos, o que comprova a alta robustez do método proposto.

Como mencionado previamente, o método utiliza duas técnicas para distinção dos eventos do sistema: a repetição ao longo de nove ciclos para distinguir de eventos de curta duração, bem

como a variação da segunda harmônica em mais de uma das fases do sistema para os eventos de longa duração.

Partindo dessa premissa, a Figura 25 mostra o comportamento dos contadores do neutro durante a energização de um banco de capacitores, uma carga linear e um ramal lateral em 0,6 s. Verifica-se que, no instante de conexão ao sistema, há incremento dos contadores. No entanto, como esses são eventos não repetitivos ao longo do tempo, não há detecção pelo método pois os contadores não somam valores acima de 9. É possível perceber que em regime permanente não há incremento desses contadores.

Figura 25 – Comportamento dos contadores do neutro C_n^I , C_n^{II} , C_n^{III} e C_n^{IV} durante a conexão de (a) banco de capacitores, (b) carga linear e (c) ramal lateral ao sistema com um ruído de 30 dB adicionado aos sinais.

Fonte: Elaborada pela autora.

Com o intuito de apresentar o comportamento do método ao conectar cargas não-lineares com variação harmônica de longa duração ao sistema, foi elaborada a Figura 26. Por meio da Figura 26 verifica-se a variação da segunda harmônica θ^2 nas três fases do sistema e seus respectivos limiares γ^2 ao conectar o forno a arco no sistema. Constata-se que as variações nas três fases são maiores que seus limiares. Isto posto, na Figura 27 são apresentados os contadores respectivos às três fases do sistema durante este chaveamento. Verifica-se que os três contadores

alcançam valores acima de 9, indicando um evento trifásico, o que impede que este evento seja detectado pelo método.

Figura 26 – Comportamento dos limiares γ^2 e das variações da segunda ordem harmônica θ^2 em relação às fases (a) A, (b) B e (c) C no chaveamento de um um forno a arco no sistema.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os outros casos de cargas não lineares simulados são a energização de um retificador, no qual os contadores das fases C_a , C_b e C_c para este caso estão apresentados na Figura 28, e a energização de transformador, cujos contadores das fases são apresentados na Figura 29. Contata-se que em ambos os casos, mesmo com a adição de ruído de 30 dB aos sinais, não há detecção, uma vez que os contadores de mais de uma três fases apresentaram valores acima de 9.

6.3 Comparação dos Algoritmos Propostos

Esta seção foi elaborada com o intuito de evidenciar os principais conceitos e testes abordados nos Algoritmos I e II propostos nesta dissertação.

Como previamente mencionado, ambos os algoritmos são baseados na variação de energia das harmônicas extraídas pela TS. Para facilitar a comparação das características dos parâmetros relacionados a cada algoritmo, foi elaborado o Quadro 10. Ao analisá-lo, nota-se que

Figura 27 – Comportamento dos contadores do método (a) C_a , (b) C_b e (c) C_c na energização de um forno a arco.

Fonte: Elaborada pela autora.

Quadro 10 – Parâmetros e métricas utilizados nos Algoritmos I e II propostos.

Proposição	Transformada	Característica	Ordens Harmônicas	Grandezas
Algoritmo I	TS	Variação da energia	1 ^a , 2 ^a , 3 ^a , 4 ^a , 5 ^a , 6 ^a e 7 ^a	Corrente de cada fase
Algoritmo II	TS	Variação da energia	2 ^a , 3 ^a , 4 ^a e 5 ^a (neutro) 2 ^a (fases)	Corrente das fases e do neutro

Fonte: Elaborado pela autora.

o Algoritmo I utiliza somente a corrente das fases, sendo que o Algoritmo II emprega as correntes das fases e do neutro. Também, observa-se que no Algoritmo II são utilizadas harmônicas até a 5^a ordem, enquanto na primeira técnica extraem-se dos sinais harmônicos de até 7^a ordem.

Além disso, no Capítulo 2 foi ressaltada a necessidade de serem delimitados os testes realizados nos algoritmos para definição da aplicabilidade de cada um deles. Com o intuito de apresentar tais características dos algoritmos propostos, foi elaborado o Quadro 11. Observa-se que ambas as técnicas utilizam limiares auto-adaptativos e empregam nos testes sinais de FAIs advindos de medições reais. Vê-se que os testes do Algoritmo I foram realizados com níveis de ruídos comuns em SDs de média tensão (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2010), mas

Figura 28 – Comportamento dos contadores do método (a) C_a , (b) C_b e (c) C_c na energização de um retificador com a adição de ruído de 30 dB.

Fonte: Elaborada pela autora.

o Algoritmo II expande sua aplicabilidade provando sua imunidade ao adicionar ruído com RSR de até 30 dB aos sinais. Por fim, verifica-se que o Algoritmo I avalia sua robustez com eventos como o chaveamento de cargas lineares, capacitores, ramais laterais, e, como carga não linear, o retificador de potência variante ao longo do tempo. Já no Algoritmo II, além dos testes mencionados, a robustez é verificada também com elevação e afundamento de tensão, com a energização de transformador e também de um forno a arco.

Assim, ao realizar a comparação dos algoritmos propostos nesta dissertação, verificam-se diversas contribuições no estudo da detecção de FAIs em SDs. É possível determinar que o Algoritmo II tem uma gama de aplicabilidade maior que o Algoritmo I, pois apresenta maior diversidade de testes e níveis de ruídos associados. Salienta-se, ainda, que o segundo algoritmo apresenta um menor número de itens parametrizáveis e de passos para cálculo do limiar e da detecção, o que implica em maior simplicidade para implementação e funcionamento do método.

Figura 29 – Comportamento dos contadores do método (a) C_a , (b) C_b e (c) C_c na energização de transformador com ruído de 30 dB.

Fonte: Elaborada pela autora.

Quadro 11 – Características dos testes realizados nos Algoritmos I e II de detecção de FAIs.

Proposição	Limiar	Testes com Ruídos	Testes com outros eventos	Sinal de FAI
Algoritmo I	Auto-adaptativo	40, 50 e 60 dB	CL*, BC*, RL*, CNL*-CR*	Real
Algoritmo II	Auto-adaptativo	30, 40 e 50 dB	CL*, BC*, RL*, ET*, AET*, CNL*- CR* e EFA*	Real

Notas:

*BC:Banco de Capacitor

*ET:Energização de Transformador

*RL:Ramal Lateral

*AET:Afundamento e Elevação de Tensão

*CL:Carga Linear

*CNL:Carga Não Linear

*CR:Chaveamento do Retificador

*EFA:Energização do Forno a Arco

Fonte: Elaborado pela autora.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a proposta de um método inédito de detecção de FAIs. Tal técnica é pautada na variação da energia das harmônicas de 2^a a 5^a ordem extraídas dos sinais da corrente de neutro do transformador da subestação por meio da TS. A distinção de outros eventos foi realizada por meio da verificação da variação da energia da 2^a ordem harmônica em mais de uma fase do sistema, bem como no atraso da detecção conferido por meio da confirmação da FAI por 9 ciclos.

Os resultados alcançados são promissores, pois mesmo com as FAIs incidindo em todas as barras do sistema, houve uma taxa de detecção de 100%, com o tempo médio de detecção variando de 0,51 a 0,37 segundos. Nesta técnica, foi testada uma variedade de eventos mais vasta que em todos os trabalhos propostos na literatura. Nota-se, ainda, que esta metodologia foi simplificada em relação ao Algoritmo I, que necessita da parametrização de diversas variáveis e apresenta um maior número de passos para o cálculo do limiar e verificação da detecção. Destaca-se também que o Algoritmo II exibe maior gama de aplicação pelos testes a que foi submetido.

Por fim, espera-se que com a proposição deste novo algoritmo seja realizada uma contribuição para o estudo da detecção de FAIs em SDs de média tensão.

CONCLUSÕES

Esta dissertação foi pautada em dois objetivos principais: a elaboração de índices para avaliação de métricas de técnicas da literatura da área, bem como a proposição de dois novos métodos de detecção de FAIs. Para tal, foram utilizados sinais reais de FAIs, além de simulados diversos eventos comuns em SDs de média tensão que possam ser confundidos com esta modalidade de falta.

A revisão bibliográfica realizada indicou as lacunas deixadas pelos trabalhos baseados na TF, TW e TS. Foi apontada a necessidade de serem executadas avaliações das técnicas com outros fenômenos comuns em um SDMT, principalmente aqueles que implicam em variações nas frequências dos sinais ao longo do tempo. Adicionalmente, foi constatada a necessidade da execução de testes específicos para delimitar a atuação das proposições.

Por meio das análises das métricas da bibliografia, foi possível avaliar a influência do ruído na detecção de FAIs, o que demonstra a necessidade de considerá-los em novas proposições. Ademais, notou-se que não há como indicar quais dos métodos de detecção de FAIs seria a melhor técnica. No entanto, pode-se relacionar as características específicas das técnicas comparando-as a partir de um mesmo plano, como por meio da indicação do campo de aplicação pautado na extensividade dos testes realizados em cada uma delas.

Em relação à primeira técnica proposta neste trabalho, o Algoritmo I, constata-se que foram alcançados resultados promissores, uma vez que não houve detecção errônea de nenhum fenômeno testado, dentre eles o chaveamento de BC, CL, CNL (retificador) e RL. Com a aplicação de FAIs advindas de sinais reais, com adição de ruído, em todo o sistema, a técnica alcançou uma taxa de detecção superior a 90% em todos os casos de ruído. Ademais, verificou-se que ao considerar um menor número de barras no sistema (como é realizado em outros trabalhos), a taxa de detecção aumentou, indicando que em sistemas com maior número de sensores, a aplicabilidade deste método poderia ser elevada. Mesmo com os resultados satisfatórios, o Algoritmo I necessita do estabelecimento de seis parâmetros além de apresentar diversas etapas

de cálculos para estabelecimento do limiar e cálculo da detecção. Tais questões podem ser interpretadas como limitações do método.

O Algoritmo II é uma evolução em relação do Algoritmo I, pois necessita de um menor número de parâmetros, variáveis e passos para determinação do limiar e da detecção. Apesar deste método também ser pautado na variação de energia das harmônicas extraídas dos sinais pela TS, esta técnica utiliza como grandeza elétrica para a detecção a corrente do neutro do transformador da subestação, sendo que as correntes das fases são utilizadas somente para distinguir a FAI de outros eventos. Nesse caso foi alcançada a taxa de detecção de 100%, inclusive com a adição de 30 dB de ruído. Destaca-se, ainda, que além dos testes já mencionados no Algoritmo I, foram realizados testes com a EFA, ET e elevação e afundamento de tensão, o que indica maior aplicabilidade deste método, pois não houve indicação de falsos positivos.

De modo geral, os resultados atingidos nesta dissertação são altamente promissores, além de conferirem originalidade dentro do estudo de FAIs, quer seja pela análise das técnicas da literatura, ou pelos novos algoritmos de detecção.

7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação, foram apresentadas diversas propostas e análises. O trabalho realizado para efeito de elaboração dessa dissertação pode prosseguir em diversas frentes. Algumas possibilidades de trabalhos futuros são elencadas a seguir:

- Extensão das análises das métricas da literatura com a aplicação em outros sistemas elétricos;
- Implementação dos algoritmos propostos em *hardware*;
- Aplicação das técnicas elaboradas nesta dissertação em outros sistemas elétricos;
- Aplicação dos algoritmos propostos em sistemas com adição de geração distribuída;
- Utilização de transformadores de corrente para obtenção dos sinais elétricos;
- Testes com FAIs causadas por vegetação;
- Testes de robustez considerando dinâmica de cargas uniformemente distribuídas, analisando o aumento progressivo da distorção harmônica;
- Avaliação do Algoritmo II com outros tipos de aterramento.

REFERÊNCIAS

2009 Victoria Bushfires Royal Commission. *Final Report*. Victoria, Australia, 2010. Disponível em: <<http://royalcommission.vic.gov.au/Commission-Reports/Final-Report.html>>. Citado na página 2.

ABOHAGAR, A. A.; MUSTAFA, M. W. Back propagation neural network aided wavelet transform for high impedance fault detection and faulty phase selection. In: **2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)**. Kota Kinabalu Sabah, Malaysia: IEEE, 2012. p. 790–795. Citado na página 25.

ALI, M. S.; BAKAR, A. H. A.; TAN, C. K.; MOKHLIS, H.; AROF, H. High Impedance Fault Localization in a Distribution Network using the Discrete Wavelet Transform. In: **2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012)**. Melaka, Malaysia: IEEE, 2012. p. 349–354. Citado na página 17.

_____. Studies on the application of wavelet families for a high impedance fault location. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, p. 5043–5054, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 1, 3, 16 e 17.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST, Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica**. Revisão 8 - Resolução Normativa nº 728/2016, 2017. Citado na página 1.

BAHADOR, N.; NAMDARI, F.; MATINFAR, H. R. Modelling and detection of live tree-related high impedance fault in distribution systems. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 12, n. 3, p. 756–766, 2018. ISSN 17518687. Citado 3 vezes nas páginas 21, 24 e 30.

BELKA, H.; MICHALIK, M. Application of The Continuous Wavelet Transform to Intermittent High Impedance Ground Fault Detection in MV Networks. In: **2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection**. Amsterdam, Netherlands: IET, 2004. p. 473–476. ISSN 05379989. Citado 5 vezes nas páginas 3, 11, 16, 17 e 25.

BISWAL, M.; DASHB, P. Detection and characterization of multiple power quality disturbances with a fast S-transform and decision tree based classifier. **Digital Signal Processing**, v. 23, n. 4, p. 1071–1083, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 26.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S.; SILVA, J. A.; SANTOS, W. C. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 6, p. 5312–5323, 2015. ISSN 00939994. Citado 5 vezes nas páginas 18, 24, 25, 29 e 30.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, J. A. C. B.; SANTOS, W. C. Real-Time Detection of Transients Induced by High-Impedance Faults Based on the Boundary Wavelet Transform. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 6, p. 5312–5323, 2015. Citado na página 11.

DEPEW, A. C.; PARSICK, J. M.; DEMPSEY, R. W.; BENNER, C. L.; Don Russell, B.; ADAMI, M. G. Field experience with high-impedance fault detection relays. In: **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference**. College Station, TX, USA: IEEE, 2006. p. 868–873. ISSN 2160-8555. Citado 3 vezes nas páginas 1, 9 e 21.

EMANUEL, A. E.; CYGANSKI, D.; ORR, J. A.; SHILLER, S.; GULACHENSKI, E. M. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, p. 676–686, 1990. Citado na página 31.

FILHO, O. D. **Utilização da Transformada Wavelet para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica**. 103 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2003. Citado na página 18.

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, 2013. ISSN 08858950. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.

GHADERI, A.; GINN, H. L.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. **Electric Power Systems Research**, v. 143, n. February, p. 376–388, 2017. ISSN 03787796. Citado 8 vezes nas páginas 2, 11, 12, 13, 15, 18, 19 e 21.

GOMES, D. P. S.; OZANSOY, C.; ULHAQ, A. High-Frequency Spectral Analysis of High Impedance Vegetation Faults on a Three-wire System. In: **2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 22.

_____. High-Sensitivity Vegetation High-Impedance Fault Detection Based on Signal's High-Frequency Contents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 33, n. 3, p. 1398–1407, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 9, 24 e 29.

HAGINOMORI, E. **Applied ATP-EMTP to Highly-sophisticated electric power systems**. 1st edition. ed. Japão, 2003. Disponível em: <<http://ps.eei.eng.osaka-u.ac.jp/jaug/haginomori/index.html>>. Citado na página 40.

IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. **IEEE 34 Node Test Feeder**. EUA, 2010. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Citado 3 vezes nas páginas 34, 47 e 60.

IEEE Power and Energy Society. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. Revision of IEEE Std 519-1992, 2014. 29 p. Citado na página 15.

KAR, S.; SAMANTARAY, S. R. Time-frequency transform-based differential scheme for microgrid protection. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 8, n. 2, p. 310–320, Fev. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 30 e 63.

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 and Distribution**, v. 12, n. 15, p. 3699–3710, 2018. ISSN 17518687. Citado na página 28.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet transforms. **Power Engineering Journal**, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 13, 16, 17 e 18.

LAI, L.; STYVAKTAKIS, E.; SICHANIE, A. Application of discrete wavelet transform to high impedance fault identification. In: **Proceedings of EMPD '98. 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery (Cat. No.98EX137)**. Singapore: IEEE, 1998. p. 689–693. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.

LAI, T. M.; SNIDER, L. A.; LO, E.; SUTANTO, D. High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 1, p. 397–407, 2005. ISSN 08858977. Citado 6 vezes nas páginas 21, 24, 25, 29, 30 e 45.

LATHI, B. P.; GREEN, R. A. **Linear systems and signals**. EUA: Oxford University Press New York, 2005. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 72.

LAZKANO, A.; RUIZ, J.; ARAMENDI, E.; LETURIONDO, L. Evaluation of a new proposal for arcing fault detection method based on wavelet packet analysis. In: **2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)**. Vancouver, BC, Canada, Canada: IEEE, 2001. p. 1328–1333. Citado na página 25.

LIMA, É. M.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. d.; SANTOS, W. C. d.; FORTUNATO, L. M. d. A. Analysis of the influence of the window used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault detection. In: . Belo Horizonte, Brazil: IEEE, 2016. p. 350–355. ISBN 9781509037926. ISSN 21640610. Citado 5 vezes nas páginas 1, 13, 14, 22 e 34.

LIMA, É. M.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. de. High impedance fault detection based on Stockwell transform and third harmonic current phase angle. v. 175, p. 105931, Out. 2019. ISSN 03787796. Citado 8 vezes nas páginas 3, 21, 26, 27, 29, 30, 44 e 50.

LIMA, É. M.; COELHO, R. A.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. High impedance fault detection based on stockwell transform. In: **2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)**. Lima, Peru: IEEE, 2018. p. 1–5. Citado 7 vezes nas páginas 26, 27, 29, 30, 50, 54 e 63.

LIMA, É. M.; JUNQUEIRA, C. M. d. S.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. de; COELHO, R. d. A.; MEDEIROS, H. G. M. S. de. High impedance fault detection method based on the short-time Fourier transform. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 12, n. 11, p. 2577–2584, 2018. ISSN 17518687. Citado 9 vezes nas páginas 2, 14, 15, 23, 24, 28, 30, 44 e 63.

MACEDO, J. R.; RESENDE, J. W.; BISSOCHI, C. A.; CARVALHO, D.; CASTRO, F. C. Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 9, n. 16, p. 2593–2601, 2015. ISSN 17518687. Citado 9 vezes nas páginas 7, 14, 23, 24, 28, 30, 31, 35 e 50.

MANSINHA, L.; STOCKWELL, R. G.; LOWE, R. P.; ERAMIAN, M.; SCHINCARIOL, R. A. Local S-spectrum analysis of 1-D and 2-D data. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 103, n. 3-4, p. 329–336, 1997. Citado na página 19.

MILIOUDIS, A. N.; ANDREOU, G. T.; LABRIDIS, D. P. Enhanced protection scheme for smart grids using power line communications techniques-Part II: Location of high impedance fault position. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 3, n. 4, p. 1631–1640, 2012.

ISSN 19493053. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6295693>>. Citado na página 27.

_____. Detection and location of high impedance faults in multiconductor overhead distribution lines using power line communication devices. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 6, n. 2, p. 894–902, 2015. ISSN 19493053. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6954542>>. Citado na página 27.

MISHRA, M.; PANIGRAHI, R. R.; ROUT, P. K. A combined mathematical morphology and extreme learning machine techniques based approach to micro-grid protection. **Ain Shams Engineering Journal**, Ain Shams University, v. 10, n. 2, p. 307–318, 2019. ISSN 20904479. Citado na página 28.

MONTEIRO, H. L. M. **Cálculo de harmônicos e inter-harmônicos baseado na norma IEC 61000-4-7**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/703>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.

MONTEIRO, H. L. M.; DUQUE, C. A.; SILVA, L. R. M.; DUQUE, C. A.; FILHO, L. M. d. A.; RIBEIRO, P. F. Comparison of interpolation methods in time and frequency domain for the estimation of harmonics and interharmonics according to IEC standard. In: **2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**. Bucharest, Romania: IEEE, 2014. p. 1–5. ISBN 9781467364874. Citado na página 13.

MOUKADEM, A.; ABDESLAM, D. O.; DIETERLEN, A. **Time-Frequency Domain for Segmentation and Classification of Non-stationary Signals: The Stockwell Transform Applied on Bio-signals and Electric Signals**. França: John Wiley & Sons, Wiley-ISTE, 2014. 21–59 p. Citado na página 19.

NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. 90 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-15122006-103128/pt-br.php>>. Citado 6 vezes nas páginas 1, 2, 8, 9, 10 e 31.

NAM, S. R.; PARKN, J. K.; KANG, Y. C.; KIM, T. H. A Modeling Method of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-Varying Resistances in EMTP. In: **2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)**. Vancouver, BC, Canada, Canada: IEEE, 2001. v. 2, p. 1175–1180. Citado na página 2.

NASON, G.; SAWCZENKO, A. Wavelet Packet Modelling of Infant Sleep State Using Heart Rate Data. **Sankhya: The Indian Journal of Statistics**, v. 63, p. 199–217, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 16.

OLIVEIRA, H. M. de. **Análise de Fourier e Wavelets: Sinais Estacionários e Não Estacionários**. Brasil: UFPE, Editora Universitária -, 2007. 342 p. ISBN 9788573154177. Citado 6 vezes nas páginas 12, 13, 14, 15, 16 e 17.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-Time Signal Processing**. EUA: New Jersey: Prentice-Hall, 1999. v. 3rd edition. Citado na página 13.

ROUTRAY, P.; MISHRA, M.; ROUT, P. K. High impedance fault detection in radial distribution system using s-transform and neural network. In: **2015 IEEE Power, Communication and**

Information Technology Conference (PCITC). Bhubaneswar: IEEE, 2015. p. 545–551. ISBN 9781479974559. Citado 5 vezes nas páginas 19, 26, 27, 30 e 63.

RUSSELL, B. D.; AUCOIN, B. M. **Energy Analysis Fault Detection System**. United States Patent, 1996. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US5512832A/en?q=+US5512832A>>. Citado na página 27.

RUSSELL, B. D.; AUCOIN, B. M.; BENNER, C. L. **Randomness Fault Detection System**. United States Patent, 1996. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US5485093A/en?q=US5485093A>>. Citado na página 27.

SAMANTARAY, S.; PANIGRAHI, B.; DASH, P. High impedance fault detection in power distribution networks using time–frequency transform and probabilistic neural network. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 2, n. 2, p. 261, 2008. ISSN 17518687. Citado 5 vezes nas páginas 3, 26, 30, 44 e 63.

SANTOS, W. C.; LOPES, F. V.; BRITO, N. S.; SOUZA, B. A. High-Impedance Fault Identification on Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 32, n. 1, p. 23–32, 2017. ISSN 08858977. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7448952>>. Citado 5 vezes nas páginas 1, 10, 16, 56 e 75.

SANTOS, W. C. dos; SOUZA, B. A. de; BRITO, N. S. D.; COSTA, F. B.; PAES, M. R. C. High Impedance Faults: From Field Tests to Modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, n. 6, p. 885–896, 2013. ISSN 2195-3880. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40313-013-0072-8>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 31.

SARLAK, M.; SHAHRTASH, S. M. High impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 5, n. 5, p. 588–595, 2011. ISSN 17518687. Citado na página 31.

SEDIGHI, A. R.; HAGHIFAM, M. R.; MALIK, O. P.; GHASSEMIAN, M. H. High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 4, p. 2414–2421, 2005. ISSN 08858977. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 29, 30, 31 e 45.

SEKAR, K.; MOHANTY, N. K. Data mining-based high impedance fault detection using mathematical morphology. **Computers and Electrical Engineering**, Elsevier, v. 69, n. April 2017, p. 129–141, 2018. ISSN 00457906. Citado na página 28.

SEKAR, K.; MOHANTY, N. K.; SAHOO, A. K. High impedance fault detection using wavelet transform. In: **2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)**. Bhubaneswar, India: IEEE, 2018. p. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 24, 29, 30 e 31.

SOHEILI, A.; SADEH, J.; BAKHSHI, R. Modified FFT based high impedance fault detection technique considering distribution non-linear loads: Simulation and experimental data analysis. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 94, p. 124–140, Jan. 2018. Citado 5 vezes nas páginas 22, 30, 31, 44 e 70.

SOHEILI, A.; SADEH, J.; LOMEI, H.; MUTTAQI, K. A new high impedance fault detection scheme: Fourier based approach. In: **2016 IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON 2016**. Wollongong, NSW, Australia: IEEE, 2016. p. 1–6. ISBN 9781467388481. Citado 5 vezes nas páginas 22, 23, 24, 28 e 30.

SOUZA, S. C. A. de. **Uso de Redes Neurais Artificiais e Transformada de Stockwell na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão**. 113 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.

STOCKWELL, R. G.; MANSINHA, L.; LOWE, R. P. Localization of the Complex Spectrum: The S Transform. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 44, n. 4, p. 998–1001, 1996. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/492555>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

TAN, R. H.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K. Numerical model framework of power quality events. **European Journal of Scientific Research**, European Journals Inc., v. 43, n. 1, p. 30–47, 2010. ISSN 1450-202X. Citado 6 vezes nas páginas 30, 54, 55, 60, 77 e 83.

TOMIC, J. J.; KUSLJEVIC, M. D.; VUJICIC, V. V. A new power system digital harmonic analyzer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 22, n. 2, p. 772–780, Abr. 2007. Citado 4 vezes nas páginas 30, 60, 71 e 77.

TRONDOLI, L. H. P. d. C. **Modelo Estocástico Parametrizável para o Estudo de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 165 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo - USP, Mar. 2017. Citado na página 31.

WAI, D. C. T.; YIBIN, X. Novel Technique for High Impedance Fault Identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 3, p. 676–686, 1998. Citado na página 31.

WANG, B.; GENG, J.; DONG, X. High-Impedance Fault Detection Based on Nonlinear Voltage-Current Characteristic Profile Identification. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 9, n. 4, p. 3783–3791, 2018. ISSN 19493053. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7792702>>. Citado na página 27.

YANG, M.-T.; GU, J.-C.; JENG, C.-Y. Detection of high impedance fault in distribution feeder using wavelet transform and artificial neural networks. In: **2004 International Conference on Power System Technology- POWERCON 2004**. Singapore, Singapore: IEEE, 2004. p. 652–657. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 31.

ZUERCHER, J. J.; TENNIES, C. J. **Arc Detection Using Current Variation**. United States: United States Patent, 1996. Citado na página 27.

AVALIAÇÃO DAS HARMÔNICAS NOS SINAIS DE FAIS

O Algoritmo I proposto nesta dissertação apresenta como métrica para a detecção de FAIs a variação de energia das ordens harmônicas extraídas pela TS dos sinais de corrente. Isto posto, este Apêndice foi elaborado com o intuito de avaliar em quais as frequências dos sinais esta métrica ainda é notável mesmo que a falta incida em um ponto distante da medição.

Para tal, foi simulada a incidência de FAIs na barra 848 do sistema teste do IEEE de 34 barras. Deste modo, a Figura 30 foi elaborada com o intuito de avaliar o comportamento das frequências das correntes registradas no sistema elétrico durante uma FAI. Assim, a Figura 30 mostra a média da variação de energia para cada ordem harmônica do sinal de corrente medido na subestação do sistema, considerando os 33 casos de FAIs reais obtidos aplicados na barra 848 assim como apresentado na metodologia do Capítulo 3. Essa barra é uma das mais distantes do ponto de medição, localizada a 57,6 quilômetros da subestação.

A análise mostra as harmônicas de 1^a a 10^a ordens com um alto nível de variação de energia entre ciclos. Tal característica não ocorre quando o sistema está em regime permanente. Deste modo, a persistência da variação de energia das ordens por variados ciclos foi aplicada nos algoritmos propostos neste trabalho. Além disso, estas harmônicas estão presentes mesmo em barras distantes da medição, como verificou-se pela Figura 30, o que indica alta aplicabilidade do exposto como métrica para detecção de FAIs.

Com o intuito de comparar os impactos sofridos pelas ordens harmônicas em relação à modificação de sua amplitude durante as FAIs, a variação de energia média entre as 7 primeiras ordens harmônicas foi calculada, como mostra a Figura 31. A componente fundamental no sinal apresenta a maior variação, uma vez que a característica senoidal é predominante. Assim, nota-se a grande variação da 3^a ordem harmônica. Em sequência, nota-se a alta variação da 5^a ordem harmônica, seguida pela 4^a, 6^a e 7^a ordens harmônicas. Por esta análise conclui-se

Figura 30 – Variação média de energia para FAIs na barra 848 no sistema teste do IEEE de 34 barras.

Fonte: Elaborada pela autora.

quais ordens harmônicas são mais afetadas pelas FAIs mesmo em barras distantes, podendo assim parametrizar métodos de detecção baseadas no impacto da variação de energia dessas frequências.

Figura 31 – Variação média de energia para cada ordem harmônica durante uma FAI no sistema teste.

Fonte: Elaborada pela autora.