JUAN CAMILO GARCÍA ARIAS

**Identificação de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas
Multiaterradas**

**São Paulo
2015**

JUAN CAMILO GARCÍA ARIAS

**Identificação de Faltas de Alta Impedância em Redes Aéreas
Multiaterradas**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Dr. Nelson Kagan

**São Paulo
2015**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de de 20

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Ficha Catalográfica

García Arias, Juan Camilo

**Identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas
multiterradas / J.C. Garcia Arias -- São Paulo, 2015.
149 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Auto-ção
Elétricas.**

**1.Faltas de alta impedância 3.Medidor de qualidade de energia
3.Análise de ondaletas 4.Redes neurais artificiais I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas II. t.**

Dedicatória

Dedico este trabajo de maestría

A mis padres, Luz Marina y Dairon (Q.E.P.D) por el amor, cariño, educación y apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mi novia Lina María, por el amor, cariño y apoyo incondicional que me ha brindado durante estos años que he estado lejos de ella.

A mis hermanos, Karen y David, por cuidar y estar con mi madre durante estos años que me he ausentado de casa.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Nelson Kagan, por confiar no meu trabalho e na minha dedicação.

Aos professores Carlos Márcio Vieira Tahan e Marcos Gouvêa, pelo incentivo e disposição durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao ENERQ (Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia), laboratório onde desenvolvi minha pesquisa.

A todos os amigos do ENERQ, pela amizade, pelos conselhos e troca de experiências. Em especial a Valdomiro Vega, Juan Diego R., Jenny Paola Gonzalez, Alejandro Fraga, Tiago Poles de Souza, Heider Berlink e Israel Casillas.

Aos pesquisadores do ENERQ, Nelson Matsuo e Eduardo Ferrari, pelas discussões que promoveram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro proporcionado para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Arias, J. C. G. **Identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas multiterradas**. 158 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2014.

As faltas de alta impedância (FAI) ocorrem quando um condutor entra em contato com objetos com uma alta resistência, o que não resulta em incrementos significativos de corrente. Este tipo de falta não pode ser detectada por dispositivos de proteção tradicionais que atuam por sobrecorrente. Neste trabalho uma pesquisa do estado da arte das FAI é apresentada e são implementados alguns algoritmos de detecção presentes na literatura. Nesta pesquisa também são propostas duas metodologias de identificação de FAI as quais são baseadas na identificação de *buildup* e incrementos de energias na faixa de frequências 1920Hz a 3840Hz. Os algoritmos implementados e as metodologias propostas foram testados com simulações de eventos de FAI e de eventos comuns numa rede simulada de uma concessionária do Estado de São Paulo utilizando o software ATP. Estudos do funcionamento de um medidor de qualidade de energia foram feitos com o propósito de determinar as limitações de uma eventual implementação real das metodologias de identificação propostas neste trabalho. Resultados do desempenho das metodologias propostas utilizando os sinais simulados em ATP apresentaram percentagens de identificação superiores aos 80%. Análise das ocorrências de cabo rompido do circuito em estudo foram feitas com o propósito de identificar possíveis eventos de FAI. O desempenho apresentado pelas metodologias propostas na identificação de FAI em sinais reais pode ser melhorado com a disponibilidade de uma maior quantidade de eventos reais de FAI.

Palavras-chave: Faltas de alta impedância, harmônicos, *Alternative Transient Program*, medidor de qualidade de energia, transformada wavelet, redes neurais artificiais.

Abstract

Arias, J. C. G. **Identification of high impedance faults in overhead multi grounded networks.** 158 p. M.Sc. Thesis – Polytechnic School of University of São Paulo, 2014.

High impedance faults (HIF) occur when a conductor makes contact with high resistance objects, generally not resulting in significant current increases. This type of fault cannot be detected by traditional overcurrent protection devices. In this work, a research of the HIF state-of-art is presented and some detection algorithms in the literature are implemented. This research also proposes two HIF identification methods based on respectively the identification of buildup current and energy increments in the frequency range from 1920Hz to 3840Hz. The implemented algorithms and the proposed methodology have been tested with ATP simulations of FAI events and other common events in a simulated network from an electric utility in the State of Sao Paulo. Studies are carried out in order to assess the operation of a power quality meter to determine the limitations of real implementations of the proposed methodologies. Performance results of the proposed methodologies using simulated ATP signals show identifications rates greater than 80%. Broken conductor occurrences in the studied feeder are analyzed to identify possible HIF events. The performance shown by the proposed methodologies in identifying HIF in real situations can be improved with the availability of a larger number of HIF events.

Keywords: High impedance fault, harmonics, Alternative Transient Program, power quality meter, wavelet transform, artificial neural networks.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Níveis de proteção de um sistema multiterrado.	2
Figura 1.2 – Evolução de trabalhos na área de FAI.....	4
Figura 1.3 – Desenho esquemático da detecção de FAI.	5
Figura 1.4 – Desenho esquemático de métodos de detecção integrados.	5
Figura 2.1 – Dependência da magnitude de corrente com a superfície em contato.	9
Figura 2.2 – Teste de FAI em grama seca	10
Figura 2.3 – Comportamento da corrente de FAI.....	11
Figura 2.4 – Comportamento da corrente de FAI em pu.	11
Figura 2.5 – Sistema de detecção de FAI da GE.	15
Figura 2.6 – Sistema de detecção de FAI da ABB.	18
Figura 2.7 – Diagrama de blocos do detector de FAI da SEL.	19
Figura 2.8 – Corrente gerada pelo modelo do arco elétrico.	26
Figura 2.9 – Modelo de diodos.....	27
Figura 2.10 – Modelo de FAI composto por três modelos de diodos.	28
Figura 2.11 – Corrente gerada pela combinação de 6 modelos de diodos.	28
Figura 2.12 – Modelo de resistências variáveis em série controladas por TACS.	29
Figura 2.13 – Corrente gerada pelo modelo de resistências variáveis controladas por TACS.	30
Figura 3.1 – Circuitos da subestação.....	33
Figura 3.2 – Diagrama simplificado do circuito A.....	34
Figura 3.3 – Percurso do circuito A.....	35
Figura 3.4 – Locais dos eventos simulados.	36
Figura 3.5 – Curva tensão vs. corrente de uma FAI.	38
Figura 3.6 – Evento de FAI no final do circuito A.....	39
Figura 3.7 – Evento de FAI do lado da carga no final do circuito A.	40
Figura 3.8 – Evento de conexão e desconexão de carga trifásica no final do circuito.	42
Figura 3.9 – Evento de conexão e desconexão de um banco de capacitores.....	43
Figura 4.1 – Sistema da Elspec®.....	46

Figura 4.2 – Tempo mínimo de disponibilidade de dados.	47
Figura 4.3 – Dificuldade com o transporte de quantidades grandes de dados.....	48
Figura 4.4 – Esquema do processo de requisição e cálculo de dados.	49
Figura 4.5 – Correntes harmônicas ih2 , ih12 , ih14 calculadas pelo G4430 no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:00m – 10/01/2014 06h:00m).....	50
Figura 4.6 – Corrente harmônica ih2 calculada pelo G4430 no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:59m:57s:500ms – 10/01/2014 01h:00m:01s:666ms).....	51
Figura 4.7 – Correntes harmônicas ih2 , ih12 , ih14 calculadas pelo Matlab® no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:00m – 10/01/2014 06h:00m).....	52
Figura 4.8 – Correntes harmônicas ih2 , ih12 , ih14 calculadas pelo Matlab® no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:00m:00s – 10/01/2014 06h:00m:01s).	52
Figura 4.9 – Comportamento da ih2 e ih3 no 10/01/2014 (sexta-feira).....	54
Figura 4.10 – Comportamento da ih2 e ih3 no 11/01/2014 (sábado). Fonte: Obtido com (Investigator®).....	54
Figura 4.11 – Comportamento da ih2 e ih3 no 12/01/2014 (domingo).	55
Figura 4.12 – Comportamento da ih2 e ih3 no 13/01/2014 (segunda-feira).....	55
Figura 4.13 – Comportamento da ih2 e ih3 no 14/01/2014 (terça-feira).	56
Figura 4.14 – Comportamento da ih2 e ih3 no 15/01/2014 (quarta-feira).....	56
Figura 4.15 – Comportamento da ih2 e ih3 no 16/01/2014 (quinta-feira).....	57
Figura 4.16 – Comportamento da ih2 , ih12 e ih14 no intervalo de tempo 10/01/2014 - 10/03/2014 (2 meses).....	58
Figura 4.17 – Comportamento da ih7 , ih9 , ih11 no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).....	60
Figura 4.18 – Comportamento da ih13 , ih15 , ih17 no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).	60
Figura 4.19 – Comportamento da ih19 , ih23 ih25 no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).....	61
Figura 4.20 – Comportamento da ih31 no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).....	61
Figura 5.1 – Desenho esquemático da implementação das metodologias de detecção.	63
Figura 5.2 – Diagrama de blocos da metodologia proposta.	64
Figura 5.3 – Bloco de detecção.	65

Figura 5.4 – Sequência lógica da Metodologia 2.	75
Figura 6.1 – (a) modelo para FAI com contato no lado da fonte, (b) modelo para FAI com contado no lado da carga.	77
Figura 6.2 – Localização das barras escolhidas para simulação da FAI.	78
Figura 6.3 – Correntes de fase do circuito A ao longo do dia segundo o Sinap®.....	79
Figura 6.4 – Diagrama da configuração 1.	82
Figura 6.5 – Diagrama da configuração 2.	83
Figura 6.6 – Diagrama da configuração 3.	85
Figura 6.7 – Diagrama da configuração 4.	86
Figura 6.8 – Diagrama da configuração 5.	87
Figura 7.1 – Oscilografia da ocorrência 7726.	101
Figura 7.2 – Oscilação transitória observada na fase A no evento 7726.....	102
Figura 7.3 – Oscilografia da ocorrência 44184.	103
Figura 7.4 – Evento no circuito A com comportamento semelhante à FAI.	105
Figura 8.1 – a) Gráfico da energia ξ_k e o instante de acontecimento do evento 2 e 3, b) gráfico da corrente I_c	110
Figura A.1 – Exemplos de wavelets mãe.	124
Figura A.2 – Processo de decomposição das wavelets.....	125
Figura A.3 – Árvore de três níveis de decomposição wavelet.	125
Figura A.4 – Análise de um sinal 1-D através da DWT.....	127
Figura A.5 – Intervalos de frequência para três níveis de decomposição ($F_s=30720\text{Hz}$).	128

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Dependência da magnitude de corrente com a superfície em contato.	9
Tabela 2.2 – Variação da taxa de detecção e taxa de falso alarme com variações do limiar.	19
Tabela 3.1 – Potências das cargas simuladas.	41
Tabela 4.1 – Número de eventos em ih2 , ih12 , ih14 calculadas pelo G4430 em diversos intervalos de tempo.	51
Tabela 4.2 – Número de eventos na ih2 , ih12 e ih14 calculadas pelo Matlab® em diversos intervalos de tempo.	53
Tabela 4.3 – Número de eventos na ih7 , ih9 , ih11 , ih13 , ih15 , ih17 , ih19 , ih23 ih25 e ih31 calculadas pelo G4430 em diversos intervalos de tempo.	59
Tabela 6.1 – Quantidade de eventos do banco de dados de simulações.	80
Tabela 6.2 – Resultados da configuração 1.	83
Tabela 6.3 – Resultados da configuração 2.	84
Tabela 6.4 – Resultados da configuração 3.	85
Tabela 6.5 – Resultados da configuração 4.	87
Tabela 6.6 – Resultados da configuração 5.	88
Tabela 6.7 – Percentagens de detecção das configurações da metodologia 1.	88
Tabela 6.8 – Resultados das configurações em porcentagens.	90
Tabela 6.9 – Percentagens de detecção da metodologia 2.	92
Tabela 6.10 – Quantidade de eventos por classe.	93
Tabela 7.1 – Campos do relatório de ocorrências.	95
Tabela 7.2 – Número de ocorrências por tipo de causa na subestação em estudo.	97
Tabela 7.3 – Ocorrências de cabo rompido no circuito A.	98
Tabela 7.4 – Cruzamento das ocorrências de cabo rompido no circuito A como o relatório de atuação dos elementos instalados na subestação A.	99
Tabela 7.5 – Cruzamento das ocorrências de cabo rompido no circuito A com as medições de oscilografia disponíveis do circuito A.	100
Tabela 8.1 – Intervalo de oscilografia analisado por ocorrência.	107

Lista de Tabelas

Tabela 8.2 – Variações de <i>n</i> e <i>k</i> testados para a metodologia 1.	108
Tabela 8.3 – Resultado da aplicação no possível evento de FAI.	109
Tabela 8.4 – Resultados da implementação da metodologia 2 nas ocorrências de cabo rompido analisadas no capítulo 7.	111

Lista de símbolos e abreviaturas

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
GE	<i>General Electric</i>
FAI	Faltas de Alta Impedância
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronic Engineering</i>
MQE	Medidor de Qualidade de Energia
RNA	Rede Neural Artificial
SD	Sistema de Distribuição
SDM	Sistema de Distribuição Multiaterrado
TC	Transformador de Corrente
TF	Transformada de Fourier
THD	Distorção Harmônica Total
TP	Transformador de Potencial
TW	Transformada Wavelet
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.1.1	Sobre as faltas de alta impedância.....	1
1.1.2	Sobre as limitações dos métodos de solução	4
1.2	Objetivos.....	6
1.3	Organização do documento.....	6
2	Revisão da literatura.....	8
2.1	Natureza da FAI.....	8
2.1.1	Magnitude da corrente da falta	8
2.1.2	Presença do arco	9
2.1.3	Características no domínio do tempo	10
2.1.4	Características no domínio da frequência.....	12
2.2	Testes reais de FAI.....	12
2.2.1	Universidade de Texas A&M	12
2.2.2	Asea Brown Boveri – ABB	13
2.2.3	Schweitzer Engineering Laboratories – SEL.....	14
2.3	Algoritmos de identificação de FAI presentes em detectores comerciais	15
2.3.1	General Electric (GE) – F60.....	15
2.3.2	ABB – REF550.....	17
2.3.3	SEL – SEL751	19
2.4	Outras metodologias de detecção presentes na literatura	20
2.4.1	Detecção de FAI utilizando extração de características com gradiente de morfologia matemática (MMG) e redes neurais multi-camada	20

2.4.2	Detecção de FAI com a energia dos coeficientes da transformada wavelet e localização da falta com alocação de vários medidores no circuito de distribuição.	21
2.4.3	Incorporação de técnicas de mineração de dados na tecnologia de proteção para detectar FAI.....	21
2.4.4	Detecção de FAI utilizando as correntes sequenciais.....	22
2.4.5	Detecção e classificação de FAI utilizando lógica <i>Fuzzy</i>	24
2.5	Modelos de FAI	24
2.5.1	Modelo do arco elétrico.....	25
2.5.2	Modelo de diodos	26
2.5.3	Modelo de resistências variáveis em série controladas por TACS.....	29
2.6	Considerações finais do capítulo	30
3	Implementação do modelo de FAI.....	32
3.1	Características da rede em estudo	32
3.2	Simulação da rede em estudo.....	33
3.3	Locais dos eventos simulados	36
3.4	Simulação do evento de FAI.....	37
3.5	Simulação de eventos geralmente presentes na rede elétrica.....	40
3.6	Considerações finais do capítulo	44
4	Descrição do sistema de medição utilizado	45
4.1	Sistema de medição e armazenamento de registros oscilográficos	45
4.1.1	Dificuldades na utilização do medidor	46
4.2	Análise de cálculos realizados pelo medidor G4430	48
4.2.1	Considerações iniciais	48
4.2.2	Análise das correntes harmônicas de ordem 2, 12 e 14.....	50
4.2.3	Comportamento das correntes harmônicas de ordem 2, 12 e 14 calculadas pelo G4430	53
4.2.4	Análise de outras correntes harmônicas calculadas pelo G4430 para propósito de detecção de eventos.....	58

4.2.5	Comportamento da <i>ih7, ih9, ih11, ih13, ih15, ih17, ih19, ih23, ih25</i> e <i>ih31</i> calculadas pelo G4430.....	59
4.3	Considerações Finais	62
5	Proposta de metodologias de detecção de FAI.....	63
5.1	Metodologia 1	64
5.1.1	Bloco de detecção.....	64
5.1.2	Algoritmo 1.....	65
5.1.3	Bloco de cálculo de indicadores	66
5.1.4	Bloco de decisão sobre os indicadores	70
5.2	Metodologia 2	70
5.2.1	Algoritmo de disparo	70
5.2.2	Cálculo de indicadores.....	72
5.2.3	Lógica de decisão	73
5.2.4	Sequência lógica da metodologia	74
5.3	Considerações finais	76
6	Desempenho das metodologias de detecção com FAI simuladas no ATP	77
6.1	Desempenho da metodologia 1	81
6.1.1	Desempenho da configuração 1.....	82
6.1.2	Desempenho da configuração 2.....	83
6.1.3	Desempenho da configuração 3.....	85
6.1.4	Desempenho da configuração 4.....	86
6.1.5	Desempenho da configuração 5.....	87
6.1.6	Conclusões sobre o desempenho das configurações da metodologia 1.....	88
6.2	Desempenho da metodologia 2.....	91
6.3	Considerações finais do capítulo	93
7	Análise de ocorrências de cabo rompido na subestação em estudo	95
7.1	Cruzamento de informações do circuito A	99

7.2	Análise de medições oscilográficas das ocorrências de cabo rompido do circuito A 100	
7.3	Possível evento de FAI	104
7.4	Considerações finais do capítulo	106
8	Aplicação prática das metodologias de detecção propostas	107
8.1	Aplicação prática da metodologia 1	108
8.2	Aplicação prática da metodologia 2	108
8.3	Considerações finais do capítulo	112
9	Conclusões.....	113
9.1	Propostas de continuidade da pesquisa	115
10	Referências bibliográficas.....	117
ANEXO A.	Teoria da transformada wavelet.....	123
ANEXO B.	Dados específicos da rede A	129

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

1.1.1 Sobre as faltas de alta impedância

As faltas de alta impedância (FAI) são aquelas faltas que ocorrem quando um condutor primário faz contato com superfícies como solo, grama, galhos de árvore ou qualquer outra superfície que apresente uma alta impedância restringindo o fluxo normal de corrente a um nível não detectável por dispositivos normais de proteção contra sobrecorrente.

Detectar este tipo de falta é indispensável tanto para as concessionárias como para a segurança de pessoas. O contato do cabo energizado com galhos de árvores pode ocasionar incêndios e, no caso de contato com o solo, significa um grave perigo para as pessoas, animais, veículos e qualquer outro objeto que se encontra próximo da linha energizada.

Em sistemas de distribuição solidamente aterrados, os neutros das cargas e dos equipamentos da rede são ligados à terra sem nenhuma impedância intencional. A dificuldade de detecção de FAI fase – terra é devida à falta de sensibilidade da proteção de sobrecorrente de terra. O nível de corrente residual criado pelo desequilíbrio de cargas e pelas correntes de fuga é usualmente mais alto do que o nível de corrente residual gerado por uma FAI. O nível de corrente da proteção é fixado a partir da corrente residual normal do sistema, pelo qual a sensibilidade não é o suficiente para detecções de FAI.

O uso de transformadores de distribuição monofásicos é comum em áreas rurais e residenciais. Esta prática faz com que a corrente de desequilíbrio de atividades de comutação seja transferida ao sistema de distribuição primária, produzindo importantes níveis de corrente no neutro. Em sistemas multiterrados, as conexões de neutro criam caminhos para as correntes de fuga, tendo-se assim fluxos descontrolados de corrente com uma magnitude significativa. A soma destas duas correntes, correntes de neutro e terra, resulta em uma corrente residual que, em condições normais, pode atingir valores acima de 100A. Assim, as baixas correntes consumidas pelas FAI não podem ser detectadas usando a tecnologia convencional de proteção baseada em sobrecorrente. A Figura 1-1 apresenta uma visão gráfica dos níveis de proteção de um sistema multiterrado.

Figura 1.1 – Níveis de proteção de um sistema multiterrado.

Fonte: Adaptado e traduzido de (RUSSELL et al., 1989).

Segundo a Figura 1.1, os relés de proteção devem ser ajustados com níveis de correntes mais altos do que a carga máxima prevista do alimentador, ficando assim protegido o alimentador para todas as faltas com níveis de corrente que excedam os níveis de corrente ajustados no relé. Isto faz com que as faltas com correntes abaixo dos ajustes não possam ser detectadas por estes dispositivos, criando-se assim uma região desprotegida do alimentador, na qual geralmente se encontram presentes as FAI.

No desenvolvimento de um sistema de detecção de FAI, é de vital importância conhecer as características próprias do comportamento desse tipo de falta assim como a influência das características inerentes ao sistema de distribuição (SD) em que elas se apresentam. A detecção de FAI fazendo uso unicamente de medições registradas na subestação é um desafio atual da área de proteção do SD. Detectar a FAI e o local geográfico são questões difíceis de alcançar já que, quando ela ocorre, as magnitudes de corrente consumidas são semelhantes às magnitudes de corrente consumidas por cargas normais do SD, podendo-se confundir assim um evento de FAI com uma entrada normal de carga no SD.

O sistema de detecção de FAI não deve lidar só com o problema de uma identificação da FAI. Assuntos como a extensão do SD, presença de diversos tipos de cargas no SD os quais geram um aumento do nível de harmônicos na rede, transformadores de medição de tensão (TP) e de medição de corrente (TC) com pouca largura de banda em frequência, assim como o desconhecimento parcial ou total dos dados elétricos de alguns elementos que constituem a infraestrutura de distribuição, contribuem para dificultar ainda mais a detecção de um evento de FAI na subestação.

As pesquisas feitas no mundo, relacionadas com FAI, têm contribuído para melhorar o conhecimento que se tem sobre o seu comportamento. Segundo a pesquisa realizada, o primeiro estudo relacionado com FAI (MAYR, O. 1943), descreveu o comportamento dinâmico da tensão e corrente em um arco. Segundo (THOMAS et al., 1995), a teoria de Mayr assume a existência de um arco de área de seção transversal constante dentro da qual a temperatura varia com a dimensão radial do arco e com o tempo. Este modelo permite prever o comportamento da característica tensão-corrente de arco, bem como o seu conteúdo harmônico.

No ano de 1977 na universidade da Texas A&M, desenvolveram-se pesquisas com o propósito de compreender as FAI, nas quais foram propostos modelos de FAI e feitas simulações em laboratório. Tal pesquisa resultou em um protótipo de relé baseado num microcomputador que foi instalado num alimentador de uma concessionária. Este procurava incrementos de energia na faixa de 2 a 10kHz nos sinais de corrente para detectar uma possível FAI (RUSSELL et al., 1989). Em (DA SILVA et al., 2013) é utilizada a transformada wavelet (TW) como técnica de análise de sinais em conjunto com redes neurais artificiais (RNA). Algoritmos de treinamento de RNA com o propósito de identificar as FAI dentre outros tipos de eventos presentes na rede são propostos em (SARLAK et al., 2011). Em (MASA et al., 2012) foi desenvolvida uma metodologia de mineração de dados que procura quais eventos dentro de um grande conjunto se encaixam no que poderia ser uma possível FAI. Localização de FAI utilizando técnica de ondas viajantes é proposta em (GLIK et al., 2013). Utilização de medidores instalados no SD para identificar e localizar as FAI pode ser encontrado em (SENGER et al., 2013).

Na Figura 1.2 é mostrada a evolução em quantidade de trabalhos desenvolvidos com o título contendo as palavras “high impedance fault” disponíveis no site da IEEE Xplore® (IEEE, 2013).

Figura 1.2 – Evolução de trabalhos na área de FAI.

Fonte: Dados obtidos de (<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, 2013).

Na Figura 1.2 se observa que nos últimos 20 anos, houve um incremento de publicações na área da detecção de FAI, o que indica uma preocupação crescente com este tipo de problema.

1.1.2 Sobre as limitações dos métodos de solução

Independentemente do método que seja usado, nem todas as FAI são detectáveis. Considere-se, por exemplo, o caso de um condutor partido perto do final de um alimentador. As pequenas correntes resultantes são difíceis de detectar por qualquer detector de FAI. Este exemplo aponta um aspecto de detecção das FAI não satisfatório. O ideal é detectar todas as faltas e, ao mesmo tempo, ser imune a todos os eventos que não sejam FAI. Na prática, é impossível detectar 100% das FAI e alcançar um elevado grau de segurança contra as falsas detecções. Isso é devido à natureza probabilística da detecção das FAI. Instalar um detector de eventos “quase perfeito” não seria rentável. Seriam necessários inúmeros pontos de monitoramento em cada alimentador, com todos os custos de manutenção envolvidos. Quando o condutor é deixado energizado no chão, este representa um perigo para o público na vizinhança imediata ao condutor caído. Portanto, a solução parece ser óbvia: aplicar o detector de FAI e desligar o circuito em tais condições. Infelizmente, a decisão não é tão simples. Nenhum dispositivo de sobrecorrente ou outra filosofia pode proteger do contato elétrico inicial. O tipo de detecção de FAI atualmente disponível é lento. Portanto, sua capacidade de prevenir e proteger contra um evento de queda do condutor e ocorrência de contato elétrico

juntos é limitada. Atualmente, pode-se ter um método para detectar a maior quantidade das FAI. A questão é exposta na Figura 1.3:

Figura 1.3 – Desenho esquemático da detecção de FAI.

Fonte: Adaptado e traduzido de (RUSSELL et al., 1989).

Na Figura 1.3 o círculo em negrito representa a área na qual se encontram todos os possíveis casos de FAI e o outro círculo representa a área coberta pelo método de detecção de FAI. Os círculos não coincidem exatamente, ou seja, existirão falsas detecções de FAI e falhas na detecção de FAI autênticas. Porém, a faixa de detecção poder ser aumentada fazendo a integração de vários métodos de detecção, como se apresenta na Figura 1.4. Em algumas condições, somente um método detectará a condição de falta, enquanto que em outras condições vários métodos poderão detectar a falta. Porém, também haverá um aumento da probabilidade de falsas detecções nessa situação.

Figura 1.4 – Desenho esquemático de métodos de detecção integrados.

Fonte: Adaptado e traduzido de (RUSSELL et al., 1989).

1.2 Objetivos

Nesta pesquisa são propostos os seguintes objetivos:

- ❖ Reconhecer as principais características presentes na ocorrência de uma FAI, com o propósito de estabelecer possíveis indicadores para a identificação deste tipo de falta.
- ❖ Implementar simulações de eventos de FAI a partir de dados elétricos de uma rede real de uma concessionária do estado de São Paulo para compor um modelo do comportamento da FAI no SD com multiterramento.
- ❖ Desenvolver um sistema de identificação de FAI que faça uso das oscilografias e cálculos fornecidos por um medidor de qualidade de energia (MQE) que registra oscilografias continuamente conectado numa subestação.

1.3 Organização do documento

No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura, destacando as características da FAI relatadas em testes reais, os modelos de simulação de FAI derivados dos testes e algumas das técnicas de identificação de FAI presentes em dispositivos comerciais de detecção, ou somente propostas na literatura.

O capítulo 3 apresenta o modelo do comportamento da FAI no SD bem como um estudo com simulações de eventos de FAI, conexão/desconexão de cargas lineares e banco de capacitores num dos circuitos da subestação em estudo.

O capítulo 4 descreve o sistema de medição que foi utilizado para capturar as oscilografias das correntes e tensões dos circuitos da subestação em estudo. Apresenta-se também neste capítulo uma análise comparativa entre as componentes harmônicas obtidas pelo medidor e as componentes harmônicas calculadas utilizando o Matlab®.

O capítulo 5 apresenta a descrição de cada uma das etapas que compõem as duas metodologias de detecção de FAI propostas neste trabalho, os algoritmos utilizados bem como os alcances e limitações das metodologias.

No capítulo 6 são apresentados os resultados do desempenho das duas metodologias propostas utilizando sinais de FAI gerados no ATP.

No capítulo 7 é apresentada a análise das ocorrências de cabos rompidos reportadas na subestação em estudo durante sete meses de observação.

O capítulo 8 apresenta os resultados da aplicação das metodologias de detecção de FAI propostas, obtidas da análise das oscilografias de ocorrências de cabo rompido analisadas no capítulo 7.

No capítulo 9 são apresentadas as conclusões do trabalho bem como as propostas para futuros trabalhos.

Finalmente, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2 Revisão da literatura

Este capítulo apresenta o estado da arte com relação à natureza, detecção e localização de FAI. Na primeira parte são descritas as principais características observadas numa ocorrência de FAI. Na segunda parte são descritos alguns testes reais realizados com o propósito de obter registros oscilográficos dos sinais gerados quando um cabo faz contato com diversas superfícies. Na sequência são apresentadas as metodologias de detecção que surgiram com estes testes e que se encontram implementadas em dispositivos comerciais. Na quarta parte serão apresentadas outras metodologias de detecção propostas na literatura. Em sequência, são apresentados três modelos de FAI presentes na literatura, os quais foram desenvolvidos com o propósito de reproduzir o mais fiel possível os comportamentos observados nas oscilografias de corrente e de tensão medidas durante um evento de FAI. No final do capítulo, são tecidas considerações finais.

2.1 Natureza da FAI

O conhecimento da natureza da FAI é um fator primordial na pesquisa de métodos de detecção e localização de FAI. A seguir são apresentadas as características que descrevem o comportamento de uma FAI.

2.1.1 Magnitude da corrente da falta

A magnitude da corrente de falta é influenciada por condições tais como tipo do solo, umidade do solo e a presença de materiais na terra que estabelecem caminhos para a corrente, tais como canos metálicos, cercas elétricas e raízes externas de árvores. A Tabela 2.1 e a Figura 2.1 fornecem magnitudes de correntes típicas observadas em testes reais de FAI.

Tabela 2.1 – Dependência da magnitude de corrente com a superfície em contato.

Superfície	Corrente (A)
Asfalto Seco	0
Concreto (não reforçado)	0
Areia seca	0
Areia molhada	15
Gramma seca (Dry sod*)	20
Gramma seca (Dry grass)	25
Gramma molhada (Wet sod*)	40
Gramma molhada (Wet grass)	50
Concreto (reforçado)	70

*sod: grama em carpete

Fonte: Adaptado e traduzido de (RUSSELL et al.,1989).

Figura 2.1 – Dependência da magnitude de corrente com a superfície em contato.

Fonte: Adaptado e traduzido de (Hou D. 2009).

2.1.2 Presença do arco

As experiências desenvolvidas em diversos testes (RUSSELL et al., 1989; SANTOS et al., 2010; MASA et al., 2011; HOU D., 2009) mostraram que frequentemente ocorrem arcos elétricos em FAI. No caso em que o cabo faz contato com superfícies tais como terra, areia, concreto ou grama, podem-se apresentar pequenos *gaps* de ar entre o condutor e a superfície. A elevada diferença de potencial elétrico sobre uma pequena distância entre o condutor e a superfície origina um arco elétrico. A Figura 2.2 mostra um arco ocasionado pelo contato de grama com um cabo energizado durante as provas realizadas por Santos et al. (2010).

Figura 2.2 – Teste de FAI em grama seca

Fonte: (SANTOS et al., 2010).

2.1.3 Características no domínio do tempo

As características no domínio do tempo da FAI são influenciadas pela superfície de contato. Em geral, pode-se observar um comportamento altamente aleatório na magnitude da corrente associada a esse tipo de faltas. As faltas podem durar indefinidamente com uma magnitude de corrente geralmente crescendo ou decrescendo ao longo da duração da falta.

Segundo Santos, as FAI geralmente causam o aparecimento de arcos elétricos, os quais geram certas particularidades na forma de onda da corrente, as quais serão descritas a seguir:

- *Assimetria*: A corrente da FAI tem diferentes valores absolutos para o ciclo positivo e o ciclo negativo.
- *Não linearidade*: A curva característica de tensão-corrente é uma curva não linear.
- *Buildup*: A magnitude da corrente incrementa gradualmente até seu máximo valor.
- *Shoulder*: Valor máximo do *Buildup* por alguns ciclos.
- *Intermitência*: Existência de ciclos nos quais o cabo energizado interrompe seu contato com a superfície.

A Figura 2.3 apresenta um exemplo de FAI onde é possível observar algumas das características descritas anteriormente.

Figura 2.3 – Comportamento da corrente de FAI.

Fonte: Adaptado e traduzido de (SANTOS et al., 2013).

Tipicamente são observados poucos efeitos na forma de onda da tensão. A Figura 2.4 também evidencia claramente o comportamento aleatório da corrente da FAI.

Figura 2.4 – Comportamento da corrente de FAI em pu.

Fonte: (Nakagomi R. M., 2006).

Observa-se também na Figura 2.3 e na Figura 2.4 que a magnitude da corrente da FAI pode variar muito de um ciclo para outro, e mesmo de um semiciclo para outro. Também podem existir longos períodos nos quais nenhuma corrente de falta flui enquanto o condutor está sobre o solo (Daqing H. 2009).

2.1.4 Características no domínio da frequência

Devido à natureza aleatória dos arcos elétricos associados aos eventos de FAI, não é possível obter um espectro de frequência preciso do arco, a ser e generalizado ao espectro de todos os arcos elétricos (RUSSELL et al., 1989). Diversos trabalhos (RUSSELL et al., 1989; KAWADY et al., 2009; MASA et al., 2012), têm mostrado a existência de componentes harmônicas ímpares na forma de onda da corrente, o que tem conduzido a que muitos sistemas de identificação incluam algoritmos focados no comportamento da terceira harmônica bem como outras harmônicas ímpares.

Variações nas componentes interharmônicas e frequências de dezenas de quilohertz também têm sido registradas para FAI com presença de arcos elétricos (HOU D., 2009). Porém, como a energia da FAI é concentrada principalmente na componente harmônica fundamental (60Hz), as componentes em alta frequência (>2kHz) e as componentes interharmônicas são pequenas em magnitude, mais mensuráveis com um acondicionamento apropriado do sinal.

2.2 Testes reais de FAI

Nesta seção são descritos, brevemente, alguns dos trabalhos desenvolvidos no mundo com testes reais de FAI. São apresentadas as características técnicas dos testes assim como as conclusões obtidas nos trabalhos a partir dos registros oscilográficos.

2.2.1 Universidade de Texas A&M

Os testes realizados na Universidade de Texas A&M na década dos anos 80 foram financiados pelo *Electric Power Research Institute* - EPRI (RUSSELL et al., 1982). No total, foram feitos 86 testes em 6 alimentadores diferentes. Destes 86, 6 foram isolados por fusível,

e 15 testes (em areia e asfalto) não proporcionaram correntes detectáveis pelos instrumentos utilizados na época. Os ensaios consideraram diferentes sistemas físicos e configurações elétricas, vários tipos de solo, diferentes comprimentos entre o ponto de falta e a subestação, vários tipos e quantidades de carga e banco de capacitores. Todos os testes foram feitos em tensão de 15 kV e os sinais foram registrados com uma taxa de 4096 amostras por ciclo de 60Hz. No relatório dos testes foram apresentadas as seguintes conclusões:

- Presença de altas frequências no instante do início e final do arco.
- Os efeitos provocados pela FAI permanecem por vários ciclos o que não ocorre com a conexão de banco de capacitores.
- A duração da presença de altas frequências é um fator importante para diferenciar as FAI de outros eventos normalmente presentes na rede elétrica.
- Grandes bancos de capacitores ligados em estrela aterrada desviam os sinais de alta frequência para a terra.

2.2.2 Asea Brown Boveri – ABB

A empresa ABB desenvolveu diversos testes. O primeiro conjunto de testes foi feito em laboratório entre 1998 e 2000, com 15 provas em 7 superfícies diferentes (grama congelada, grama úmida, solo, asfalto, cascalho, areia e concreto) totalizando 105 casos. Todos os casos tiveram uma duração de 5 segundos, foram feitos com uma tensão de 9 kV, medidos com uma taxa de amostragem de 20kHz, quantizados a 14 bits e acondicionados com o software LabView®. O mesmo sistema de medição das FAI foi utilizado para obter as correntes de cargas não lineares, como TVs, lâmpadas fluorescentes, computadores, fontes de retificação, soldador de arco e controlador de motor monofásico, gerando-se assim 22 arquivos de cargas (DAS et al., 2007).

O segundo conjunto de testes foi realizado num SD real isolado da concessionária TXU Huntington em Texas, no ano de 2004, em duas épocas do ano (janeiro e setembro). Os testes foram feitos com tensões de 7,2 kV e 14,4 kV, em superfícies tais como; concreto, cascalho, asfalto, areia, árvores e combinação destas superfícies (CARPENTER et al., 2005).

Do conjunto de testes feitos, foram reportadas pelos documentos da ABB as seguintes conclusões.

- Superfícies tais como areia e cascalho sustentavam a integridade do cabo por vários minutos, gerando-se fumaça e os fusíveis de proteção só se fundiam quando a corrente achava um caminho para a terra.
- O concreto sustentava a integridade do cabo por vários minutos. Nesta superfície se produziam mais arcos visíveis do que em areia e cascalho. Em algumas ocasiões se produzia o derretimento do cabo.
- As árvores mantêm a integridade do cabo por mais de 13 minutos sem produzir ativação do fusível de proteção.
- Nos testes feitos em asfalto, o medidor não registrava nenhuma corrente de falta e não se apresentou geração de arcos elétricos.

2.2.3 Schweitzer Engineering Laboratories – SEL

Os testes desenvolvidos pela SEL foram realizados nos anos de 2005 e 2008 em concessionárias da América do Norte e um teste numa concessionária na América do Sul. As superfícies de contato utilizadas nos testes foram areia, terra, concreto, asfalto, cascalho, árvores e pneus, com tensões de teste de 13,8 kV e 13,2 kV. As tensões e correntes foram registradas com uma taxa de amostragem de 20kHz em pontos distantes do local da falta. Para cada um dos testes foram registrados 1 minuto antes da falta e 3 minutos depois da falta. No documento da SEL (Daqing H. 2009) foram reportadas as seguintes conclusões:

- Os testes feitos em árvores mostraram variações pequenas no conteúdo de frequências harmônicas.
- Para os testes feitos em asfalto não foram registradas correntes de falta.
- Em testes com presença de arcos não foi observada muita atividade nas interharmônicas da corrente, mas foram geradas variações significativas nas harmônicas ímpares.
- Muitas das provas realizadas mostraram que não é possível reproduzir as mesmas características de FAI. As FAI são processos dinâmicos. É possível detectar uma FAI num certo local, mas em outra época do ano, no mesmo local, existe a possibilidade de não se detectar a FAI.

2.3 Algoritmos de identificação de FAI presentes em detectores comerciais

Nesta seção serão apresentadas as metodologias de detecção de FAI implementadas em três dispositivos comerciais. Os algoritmos que se encontram implementados nos dispositivos surgiram a partir dos conhecimentos adquiridos com as pesquisas de campo que foram relatadas na seção 2.2.

2.3.1 General Electric (GE) – F60

O sistema de detecção é baseado em algoritmos e tecnologias desenvolvidas pela universidade de Texas A&M por mais de 20 anos de pesquisa. Todo o processo de detecção envolve nove algoritmos, cada um focado numa detecção ou classificação específica. O detector precisa da entrada das três correntes de fase (I_a, I_b, I_c) e da corrente de neutro (I_n). As entradas de tensão são usadas para melhorar a segurança e dar apoio à identificação por fases, mas elas não são utilizadas para detecção de arcos. O sistema assume que um condutor esteja rompido se ocorrer uma perda de carga ou um distúrbio de sobrecorrente provocado por um arco que também foi detectado. Na Figura 2.5 é apresentado o diagrama de blocos do sistema de detecção.

Figura 2.5 – Sistema de detecção de FAI da GE.

Fonte: Adaptado e traduzido de (WESTER et al., 2000).

O algoritmo de identificação de mudanças na energia é baseado em observações de testes de FAI, operação de capacitores e operação de reguladores de tensão, onde se observou que faltas com condutor rompido e presença de arco produzem um incremento notável de energia na faixa de 2 a 10kHz no sinal de corrente. Também foi observado que enquanto os eventos normais também produziram incrementos similares de energia na mesma faixa, os incrementos sempre foram por um tempo limitado, só uns poucos ciclos, diferente ao que se observou nos testes de cabo rompido com presença de arco, onde a presença de energia na faixa em estudo teve uma duração bem maior da que os eventos normais.

O algoritmo de detecção de aleatoriedade nas mudanças da energia utiliza os mesmo níveis de incremento de energia na faixa de 2 a 10kHz. Quando é achado um incremento de energia nesta faixa, que se desvia da média por certa percentagem, o estado do sistema muda de “normal” para “perturbação”. No estado de “perturbação”, o algoritmo conta o número de transições de um nível alto de energia (arco) para um nível baixo de energia (não arco) num tempo de 30 ciclos e conta o número de ciclos adjacentes com um nível de energia que difere de uma certa percentagem da média. Se algum dos contadores excede um número preestabelecido, é feita a indicação de uma FAI.

O algoritmo detector de evento de carga baseia-se na discriminação das variações rápidas das variações lentas que se apresentam no sinal de corrente. As discriminações são feitas utilizando duas técnicas de extração da corrente de FAI da corrente total do alimentador. A primeira técnica do algoritmo detector de evento de carga faz uma subtração ponto a ponto das amostras do ciclo prévio com as amostras do ciclo atual. Em condições normais, a saída da subtração, segundo Russell et al. (1989), deveria ser pequena, já que o carregamento do sistema tende a mudar lentamente. Sempre que a subtração produz uma variação na saída, algum evento teria ocorrido. Desta forma, o tempo é utilizado como um fator discriminatório. Se a saída da subtração muda de um nível estável para outro nível estável, uma falta não é acusada, já que a variação é provavelmente devida a um evento normal de comutação. No entanto, se a saída da subtração continua apresentando flutuações, é indicado um evento de falta.

A segunda técnica do algoritmo detector de evento de carga calcula o espectro de frequência do sinal de corrente a cada ciclo, usando a informação do espectro, e tenta-se prever quais deveriam ser as amostras presentes no ciclo seguinte. Se existe uma estreita concordância entre os dois ciclos, o estado do sistema é assumido como normal. Se existir

uma grande discrepância entre os ciclos que se mantêm por uma quantidade de tempo estabelecida, a falta é indicada.

O algoritmo de padrão de centelhamento do arco baseia-se no fato que, quando um arco começa, geralmente centelha várias vezes antes de se estabilizar. Estes centelhamentos geram componentes de alta frequência no sinal de corrente. Também, uma pequena atividade nas componentes de alta frequência é gerada quando o fluxo de corrente se extingue no nível zero da tensão. Esta sequência de eventos produz atividade nas componentes de alta frequência que pode ser correspondida muito bem com a fase da tensão. As pesquisas determinaram que a busca de incrementos de nível de energia em diversas porções do período da onda de tensão, poderia ajudar a diferenciar faltas com arco de outros eventos que podem causar incrementos nas componentes de alta frequência.

O algoritmo de análise de carga reconhece os padrões associados aos eventos de conexão/desconexão de carga, bem como tem a capacidade de diferenciar eventos mais complexos, nos quais a falta foi resolvida por uma chave automática.

2.3.2 ABB – REF550

O sistema proposto pela ABB inclui três sistemas individuais de detecção de FAI os quais são apresentados na Figura 2.6. Estes algoritmos são baseados na transformada de wavelet (TW), redes neurais artificiais (RNA) e estatísticas de ordem superior. Cada um dos algoritmos de detecção de FAI tem um nível de confiança diferente. Uma falta é identificada como FAI quando ela é detectada de forma independente pelos algoritmos e processada através do bloco de decisão lógica.

A Figura 2.6 apresenta um sistema de detecção de FAI que inclui um sistema de detecção identificado como sistema de segunda ordem estatística, um sistema de detecção baseado na TW, e um sistema de detecção baseado em RNA. Conforme Figura 2.6, os sinais do sistema são adquiridos, filtrados e depois processados pelos algoritmos individuais de detecção de FAI. Os resultados destes algoritmos são processados por um bloco de lógica que fornece a decisão da detecção. O bloco de decisão lógica pode ser modificado dependendo dos requisitos da aplicação. O propósito do uso de vários algoritmos de detecção, segundo a ABB, é aumentar a confiabilidade e a segurança.

Figura 2.6 – Sistema de detecção de FAI da ABB.

Fonte: Adaptado e traduzido de (DAS et al., 2004).

A detecção baseada em estatísticas de segunda ordem calcula a energia do sinal filtrado utilizando integração de poliespectro (*integrated polyspectra*) em cada uma das correntes de fase. Depois, a energia calculada é comparada com um limiar para determinar se há ocorrência de FAI.

A detecção utilizando TW calcula a energia do sinal contida dentro de alguns dos detalhes da TW. Depois a energia calculada é comparada com um limiar preestabelecido para determinar a ocorrência de FAI. Os experimentos desenvolvidos pela ABB, segundo DAS et al. (2004), indicaram que existem detalhes da TW que carregam mais informação sobre a FAI do que outros.

Na detecção utilizando RNA são utilizadas duas redes neurais em paralelo. A primeira utiliza as amostras do sinal contidas numa janela de 3 ciclos e a segunda utiliza as componentes da transformada de Fourier (TF) do sinal contido na janela de 3 ciclos. Esta última RNA limita as componentes até a 13ª harmônica. A classificação positiva de um evento de FAI tem como saída “1” e a classificação como outro evento tem saída “0”. As duas redes foram treinadas utilizando 600 casos (300 de FAI e 300 de conexão de carga monofásica não linear) e os desempenhos das redes foram avaliados utilizando 3600 casos (1800 de FAI e 1800 de conexão de carga monofásica não linear). A saída final é obtida somando as saídas

das duas RNA. Na Tabela 2.2 são apresentados os resultados obtidos na classificação quando são utilizados diversos limiares para a soma das saídas das duas redes.

Tabela 2.2 – Variação da taxa de detecção e taxa de falso alarme com variações do limiar.

Limiar	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Taxa de Detecção	85,40%	74,90%	71,70%	68,70%	66,90%	65,30%
Taxa de Falso Alarme	16,10%	9,20%	7,80%	7,20%	6,60%	6,10%

Fonte: Adaptado e traduzido de (DAS et al., 2004).

Segundo DAS et al. (2004), uma falha na sincronização da janela de 3 ciclos com o cruzamento por zero do sinal analisado, evita que a RNA detecte os padrões e características associados às FAI, tais como assimetrias no meio ciclo e variações de ciclo a ciclo.

2.3.3 SEL – SEL751

O relé SEL751 tem tecnologia de detecção de arcos elétricos cujo objetivo é incrementar a detecção de FAI tanto quanto for possível mantendo a segurança na detecção. A Figura 2.7 mostra o diagrama de blocos do algoritmo de detecção proposto pela SEL.

Figura 2.7 – Diagrama de blocos do detector de FAI da SEL.

Fonte: Adaptado e traduzido de (Daqing, H. 2009).

O primeiro bloco do sistema calcula um sinal chamado somas de diferenças da corrente (SDI), o qual é composto da soma das diferenças entre a corrente de um ciclo e a de outro ciclo para uma taxa de 32 amostras por ciclo de 60Hz. Um filtro com resposta ao impulso infinita (IIR) limita o valor médio que serve como referência para o SDI. O bloco de tendência e memória compara o valor presente de SDI com a média do SDI e memoriza o tempo e razão do valor presente de SDI. Este bloco estabelece se o SDI atual é maior do que um limiar estabelecido pela média do SDI. O bloco de decisão lógica utiliza o resultado da

tendência e o bloco de memória estabelece a existência de uma FAI na fase que está sendo analisada. O bloco de afinação adaptativa monitora o ruído de fundo do alimentador em operação normal e estabelece um limiar de comparação para o bloco de tendência e memória.

2.4 Outras metodologias de detecção presentes na literatura

Além das metodologias de detecção de FAI descritas na seção anterior, existe uma quantidade bem maior de metodologias presentes na literatura, muitas delas, sem serem implementadas em dispositivos comerciais. Em resposta à incapacidade dos medidores atuais de oferecer uma detecção eficiente e confiável, são propostas em artigos e revistas, novas metodologias de detecção de FAI, as quais tentam dar uma solução a este problema. Na seção a seguir são apresentadas algumas das outras metodologias de detecção que se encontram presentes na literatura.

2.4.1 Detecção de FAI utilizando extração de características com gradiente de morfologia matemática (MMG) e redes neurais multi-camada

A técnica de MMG é usada para ressaltar as irregularidades presentes na forma de onda da corrente durante a ocorrência de uma FAI e a ocorrência de outros fenômenos similares. Depois de ser detectada uma irregularidade maior, por meio de um limiar estabelecido, a técnica de MMG é aplicada aos três meios ciclos seguintes ao instante de ocorrência do evento. De cada um dos três resultados são extraídos os valores médios, desvio padrão, mínimo e máximo. O treinamento da RNA é realizado com tais características. Esta metodologia, proposta em Sarlak et al., (2011), é comparada com outras metodologias de extração de características como TF, transformada-S e TW. Os resultados desta comparação mostraram que a metodologia MMG fornece melhores resultados devido à facilidade de extração de características do meio ciclo seguintes à ocorrência da falta e maior percentagem de segurança na detecção de uma FAI, bem como na distinção da FAI com relação a outros eventos semelhantes.

2.4.2 Detecção de FAI com a energia dos coeficientes da transformada wavelet e localização da falta com alocação de vários medidores no circuito de distribuição.

A metodologia proposta em Lopes et al. (2013) não precisa dos parâmetros do alimentador e faz uso da TW para monitorar os transitórios induzidos pela FAI em pontos do SD utilizando os canais disponíveis para a comunicação do *Smart Grid*.

O algoritmo de detecção é baseado na identificação de mudanças rápidas da energia contida nos coeficientes de detalhe da TW do sinal de corrente. Tais energias permanecem constantes durante o estado estacionário da falta e incrementam rapidamente no início da falta. Com o propósito de identificar a ocorrência de uma FAI de forma precisa, é estabelecido um limiar para as energias de cada uma das fases. Quando ocorrer um incremento de energia nos coeficientes wavelet que ultrapasse o limiar e permanecer constante por vários ciclos, fenômeno que não ocorre com outros eventos (conexão – desconexão de cargas e banco capacitores), ativa-se o alarme de detecção de uma FAI.

A possível localização da falta é feita com os dados das energias obtidas pelos medidores instalados na rede no instante em que foi detectada a ocorrência da FAI. Os medidores que registrarem as três maiores energias permitirão a obtenção do local da falta.

2.4.3 Incorporação de técnicas de mineração de dados na tecnologia de proteção para detectar FAI

O propósito da metodologia proposta em Masa et al. (2012) é determinar indicadores para diferenciar as FAI de outros tipos de eventos e aplicar técnicas de mineração de dados para obter um método de classificação. Na primeira parte do trabalho são definidos nove indicadores para caracterizar os comportamentos de intermitência dada pelos arcos, aleatoriedade, assimetria na forma de onda, presença de interharmônicas, baixo nível de corrente e presença da terceira harmônica da corrente, que correspondem às características que são observadas numa ocorrência de FAI. Depois é feito o cálculo destes indicadores aos sinais de FAI simulados em laboratório, sinais de FAI registrados em diversas concessionárias e sinais registrados em condições normais de operação. Os resultados dos indicadores são inseridos no software WEKA, o qual classifica os sinais em evento normal do sistema ou evento de FAI. A metodologia proposta em Masa et al. (2012) mostrou uma taxa de

assertividade na detecção de 98,3%. Tal assertividade foi obtida utilizando-se como entrada da metodologia uma base de dados de FAI. A base de dados de FAI é composta por sinais simulados no laboratório de alta tensão da Universidade Livre de Bruxelas (ULB), sinais gerados no laboratório de testes de alta potência da Siemens AG em Berlim e sinais gerados na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

2.4.4 Detecção de FAI utilizando as correntes sequenciais

2.4.4.1 Monitoramento da componente de sequência negativa das correntes.

O algoritmo proposto em Senger et al. (2010) é baseado no monitoramento das correntes que circulam pelo alimentador e opera com uma sensibilidade muito mais elevada do que a encontrada na função de sobrecorrente convencional. Atuações indevidas, provocadas pela alta sensibilidade do algoritmo, são evitadas com a utilização de diversas condições adicionais que devem ser verificadas antes de se gerar o sinal de atuação.

O algoritmo foi desenvolvido exclusivamente para a detecção de FAI provocadas pelo rompimento e queda ao solo de um condutor do alimentador primário. Dessa forma, o algoritmo considera a sequência de eventos ao longo do tempo que ocorre durante o desenvolvimento desse tipo de falta. No evento de rompimento do condutor, a abertura de uma das fases do alimentador desequilibra as correntes trifásicas que alimentam a carga que se encontra à jusante do ponto de rompimento. Esse desequilíbrio altera a magnitude da componente de sequência negativa das correntes. Quando se tem rompimento, o cabo tem um tempo de queda que pode ser estimado pela expressão $t_{queda} = \sqrt{2h/g}$, onde h é a altura do condutor em relação ao solo e g a aceleração da gravidade. Para redes de distribuição típicas resultam tempos de queda da ordem de 1,4 s. Uma vez que o cabo faz contato com o solo, a corrente de falta é drenada para o solo. No caso de ter-se contato do lado da fonte, a magnitude da corrente de falta é limitada, principalmente, pela impedância de falta verificada no local. No caso do contato do lado da carga, a magnitude da corrente de falta, além da impedância de falta, será limitada também pela magnitude da impedância de carga localizada à jusante do ponto de rompimento.

No primeiro passo, o cálculo da variação da sequência negativa é baseado na equação $\Delta I_2 = I_2 - I_2^{medio}$, onde I_2^{medio} é o valor médio da sequência negativa da corrente (I_2) observado nos vinte ciclos anteriores ao instante de ocorrência da falta. Se a condição $\frac{2*|\Delta I_2|}{I_1^{medio}} > k_1$ onde k_1 é uma constante ajustável pelo usuário e I_1^{medio} é o valor médio da

sequência positiva da corrente (I_1), é satisfeita, indica-se um potencial evento de rompimento de condutor. A seguir detecta-se a fase envolvida no evento observando-se o ângulo de ΔI_2 . O ângulo entre 0° e 120° corresponde a falta na fase B, entre 120° e 240° uma falta na fase A e entre -120° e 0° uma falta na fase C.

Uma vez identificada a fase envolvida na falta, três segundos depois do instante em que foi detectada a falta, o algoritmo faz o seguinte cálculo: $\Delta I_N = I_N - I_N^{medio}$, onde I_N^{medio} é o valor médio da corrente de neutro (I_N) medida durante um segundo depois da detecção do evento. O ângulo de ΔI_N entre -60° e 60° corresponde a falta na fase A, entre 180° e 300° uma falta na fase B e entre 60° e 180° uma falta na fase C. A fase detectada com o ângulo de ΔI_2 deve coincidir com a fase detectada com o ângulo ΔI_N . Quando isto ocorrer é dado o alarme de FAI.

2.4.4.2 Detecção por grau de desequilíbrio do sistema

Em Farina (2012) é proposta uma metodologia de detecção através da medição do grau de desequilíbrio da rede elétrica e da implementação da técnica desenvolvida em religadoras e chaves seccionalizadoras. Neste trabalho é desenvolvido um software para calcular os níveis de desequilíbrio de corrente utilizando as medições da corrente de sequência positiva (I_1), corrente de sequência negativa (I_2) e corrente de sequência zero (I_0) em sistemas elétricos típicos de distribuição. Os índices de desequilíbrio são calculados com o seguinte equacionamento:

$$I_{a0} = \frac{1}{3} * (I_a + I_b + I_c) \quad (2.1)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} * (I_a + a * I_b + a^2 * I_c) \quad (2.2)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} * (I_a + a^2 * I_b + a * I_c) \quad (2.3)$$

$$\alpha_0 = \frac{|I_{a0}|}{|I_{a1}|} * 100\% \quad (2.4)$$

$$\alpha_2 = \frac{|I_{a2}|}{|I_{a1}|} * 100\% \quad (2.6)$$

Onde α_0 é o desequilíbrio de correntes de sequência zero e α_2 é o desequilíbrio de correntes de sequência negativa.

Com um estudo prévio dos desequilíbrios típicos do alimentador torna-se possível escolher os ajustes dos detectores de desequilíbrios para que eles comandem a abertura do sistema apenas quando uma FAI ocorra, e não quando houver um desequilíbrio ordinário.

2.4.5 Detecção e classificação de FAI utilizando lógica *Fuzzy*

Em Barros (2009) é apresentada uma metodologia para detecção e classificação que utiliza um cálculo simples via observação da diferença absoluta entre o valor eficaz médio estimado e o valor eficaz medido a partir da oscilografia das correntes trifásicas. Caso seja detectada uma anomalia na corrente, procede-se à sua classificação baseada na lógica *fuzzy*. As características do estado do sistema são extraídas das medições de tensão e corrente distribuídas ao longo do sistema. A metodologia proposta considera apenas medições de corrente realizadas na subestação de distribuição de energia elétrica, o que possibilita, prioritariamente, reduzir investimentos.

A identificação da FAI é caracterizada pelo índice p , que é a diferença absoluta entre a amplitude estimada das correntes trifásicas e a amplitude medida das correntes trifásicas. Esta etapa é, essencialmente, um cálculo algébrico simples, a partir das informações da oscilografia das correntes trifásicas. Se é constatada uma anomalia de corrente, o passo seguinte constitui a classificação da falta. Esta etapa é executada por um sistema de inferência *fuzzy*.

A saída do algoritmo resulta numa indicação do tipo de falta. Os dados necessários para os diagnósticos de FAI foram obtidos através de simulações de um modelo de alimentador radial no software ATP. Os resultados mostrados no trabalho foram satisfatórios e demonstraram viabilidade da metodologia proposta para ser implementada como sistema de detecção em tempo real.

2.5 Modelos de FAI

Na sequência são descritos alguns modelos propostos na literatura que procuram reproduzir, o mais fiel possível, algumas das características mencionadas nos itens anteriores. Alguns destes modelos foram modificados em trabalhos posteriores com o propósito de criar um modelo mais semelhante da realidade.

Baseado nestes modelos vem surgindo várias pesquisas na área de identificação das FAI, por serem uma alternativa que não requer a adequação de locais para testes nem de instrumentos de medição.

2.5.1 Modelo do arco elétrico

O modelo considera a hipótese de ignição de arco elétrico no ponto da falta, dado pelo contato entre o condutor e o isolamento parcial da superfície. Assim, este modelo de FAI consiste na soma de uma constante de resistência R_{gp} , que representa o caminho para a terra através do contato com a superfície, e uma resistência não linear $r(t)$ que representa o arco. O modelo que descreve o arco é derivado da descrição genérica de arcos de Elkalashy et al. (2005) cuja equação é descrita em 2.7:

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \{G(t) - g(t)\} \quad (2.7)$$

Onde $g(t)$ é o tempo de variação da condutância do arco, $G(t)$ é a condutância estacionária do arco e τ é constante de tempo relacionada com a perda de energia durante o processo do arco. A condutância estacionária do arco é definida por:

$$G(t) = \frac{|i_{arc}|}{u_{arc}} \quad (2.8)$$

$$u_{arc} = (u_0 + r_0 |i_{arc}|) l_{arc} \quad (2.9)$$

Onde i_{arc} é a corrente de arco instantânea, u_{arc} é a tensão estacionária do arco, u_0 é a tensão característica por longitude do arco, r_0 é a resistência característica por longitude de arco e l_{arc} é a longitude do arco. A constante do tempo é definida como:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{l_{arc}}{l_0} \right)^\alpha \quad (2.10)$$

Onde τ_0 é a constante inicial de tempo, l_0 é a longitude de arco inicial e α é um coeficiente de valor negativo.

Como pode ser observado nas equações (2.9) e (2.10), a tensão estacionária do arco e a constante de tempo dependem da longitude do arco. A variação da longitude do arco é altamente dependente de fatores externos, o qual dificulta considerar seu valor no modelo do

arco elétrico. Entre os trabalhos que aplicam o modelo do arco elétrico podem-se mencionar Elkalashy et al. (2005), Masa et al. (2011) e Shebl et al. (2010).

O modelo de arco elétrico foi implementado no software ATP e a mostra a forma de onda da corrente obtida na simulação deste modelo.

O gráfico b) da Figura 2.8 é uma ampliação do sinal, onde se observa a descontinuidade nos pontos de cruzamento por zero gerados pelo modelo do arco elétrico.

2.5.2 Modelo de diodos

O modelo é composto pela conexão de um diodo invertido em paralelo com outro diodo, sendo conectado cada diodo em série com uma fonte de tensão contínua. O modelo foi proposto em Emanuel et al. (1990). Nesta configuração, a corrente de falta circula por meio

do V_p durante o semiciclo positivo e por V_n durante o semiciclo negativo. Na Figura 2.9 é apresentado o modelo de diodos.

Figura 2.9 – Modelo de diodos.

Fonte: Adaptado de (Emanuel et al. 1990).

Devido ao fato do semiciclo positivo da corrente de falta ser maior do que o negativo em alguns casos de FAI, utiliza-se V_n maior que V_p . A ocorrência do aparecimento de conteúdos harmônicos é controlada pela diferença entre as fontes $\Delta V = V_n - V_p$ e pela razão entre a reatância X_L e a resistência R ($\tan\theta = X_L/R$). O modelo original é usado nos trabalhos Samantaray et al. (2008) e Etemadi et al. (2008).

Este modelo permite uma fácil implementação das características de não linearidade e assimetria das correntes do arco elétrico. Em diversos trabalhos este modelo tem sido modificado com o propósito de fazê-lo reproduzir melhor o início de uma FAI, por meio de uma cópia do modelo com variações nos valores das resistências e tensões das fontes em paralelo com o modelo original. Mediante a conexão sucessiva de até 6 modelos se consegue visualizar o comportamento do incremento gradual da corrente no instante do contato do cabo com a superfície. Nos trabalhos Sedighi et al. (2010) e Zanjani et al. (2012), conectam-se os vários modelos para obter o comportamento mencionado. A Figura 2.10 mostra um dos arranjos propostos utilizando o modelo de Emanuel (Emanuel et al. 1990).

Figura 2.10 – Modelo de FAI composto por três modelos de diodos.

Fonte: Adaptado de (ZANJANI et al., 2012).

Na Figura 2.11 apresenta-se a corrente obtida quando é simulada uma combinação de 6 modelos de diodos.

Figura 2.11 – Corrente gerada pela combinação de 6 modelos de diodos.

Na Figura 2.11 se observam as descontinuidades geradas pelo modelo nos pontos de cruzamento por zero do sinal, assim como o comportamento crescente da corrente de falta até um valor estável.

2.5.3 Modelo de resistências variáveis em série controladas por TACS

Este modelo proposto em NAM et al. (2001) é composto de duas resistências em série, variáveis no tempo, controladas pela rotina *Transient Analysis of Control Systems* (TACS) do ATP. Neste modelo, a resistência R_1 simula as características de não linearidade e assimetria da FAI, atuando nos regimes transitório e permanente. A resistência R_2 simula o fenômeno de elevação da corrente no momento da ocorrência da falta e o período em que a corrente da falta permanece constante antes de voltar a crescer. Na Figura 2.12 é representado o modelo.

Figura 2.12 – Modelo de resistências variáveis em série controladas por TACS.

Fonte: Adaptado de (NAM et al. 2001).

Para obter R_1 , é utilizada a curva de tensão versus corrente de um ciclo, no qual não existem modificações significativas de amplitude com os ciclos subsequentes, ou seja, no regime permanente da falta. A corrente que corresponde a uma tensão no momento da ocorrência da falta é calculada da seguinte forma:

$$i(t) = \begin{cases} i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times \Delta v, & \text{se } v_n < v(t) < v_{n+1} \\ i_n, & \text{se } v(t) = v_n \end{cases} \quad (2.11)$$

Sendo $v(t)$ a tensão no alimentador no ponto de falta, $\Delta v = v(t) - v_n$, onde v_n e i_n são a tensão e a corrente da curva característica na amostra n , respectivamente. A resistência R_1 é calculada como:

$$R_1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{v(t)}{i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times (v(t) - v_n)} \quad (2.12)$$

Para o cálculo de R_2 é possível utilizar uma função exponencial, uma função racional ou uma função polinomial. Melhores resultados são obtidos quando se utiliza uma função exponencial (SANTOS et al., 2012). O uso de uma função exponencial para o cálculo de R_2 também é proposto em Nakagomi (2006). Em Santos et al. (2012) é proposta a seguinte equação para o cálculo de R_2 :

$$R_2 = 989,54e^{-22,45t} \quad (2.13)$$

Na Figura 2.13 se mostra o resultado da implementação no software ATP do modelo de resistências controladas por TACS.

A Figura 2.13, de forma similar ao que acontece com a Figura 2.11 (modelo de diodos), evidencia um comportamento crescente da corrente de falta até um valor estável. Na Figura 2.13 não é possível visualizar as descontinuidades observadas nos pontos de cruzamento por zero do sinal, mas as descontinuidades também se encontram presentes neste modelo de FAI.

2.6 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou o estado da arte das FAI, descrevendo-se as principais características que se apresentam durante a ocorrência deste tipo de falta. Também foram mencionados alguns dos testes que têm sido realizados no mundo, com o propósito de reproduzir a FAI e registrar seu comportamento. Apresentaram-se as metodologias de detecção implementadas em alguns dos detectores comerciais de FAI bem como foram

descritas outras metodologias de detecção e localização de FAI. No próximo capítulo serão apresentadas as simulações do circuito em estudo.

3 Implementação do modelo de FAI

Este capítulo apresenta a descrição e simulação do circuito que será estudado em ATP, os resultados das simulações de conexão e desconexão de cargas assim como os resultados da simulação de eventos de FAI. Após a análise dos modelos de FAI descritos no capítulo 2, optou-se por implementar o modelo de resistências variáveis em série controladas por TACS. A escolha do modelo baseou-se no fato de que ele reproduz um número maior de características observáveis nos eventos de FAI e tem uma maior flexibilidade de configuração e adaptação.

3.1 Características da rede em estudo

A rede estudada neste trabalho é composta pelos circuitos da subestação de uma concessionária do estado de São Paulo. A subestação em estudo possui um total de 16 circuitos, 8 sendo ligados num transformador e os outros 8 ligados num outro transformador. Os valores nominais dos dois transformadores é de 40/60 MVA a 131,6/13,8 kV. A tensão dos circuitos é de 13,8 kV e a seção nominal do cabo do circuito primário é 336 MCM. Cada um dos 16 circuitos apresenta diversos tipos de clientes ligados (industrial, residencial, comercial). Os bancos de transformadores MT/BT que se encontram ligados nos circuitos do primário são do tipo delta aberto, delta fechado, os quais provocam desequilíbrios nas fases dos circuitos. Na Figura 3.1 é mostrada uma imagem satélite dos circuitos da subestação em estudo.

Figura 3.1 – Circuitos da subestação.

Fonte: Adaptado de (Sinap® e Google Earth®).

3.2 Simulação da rede em estudo

Dos circuitos que compõem a subestação em estudo, foi escolhido o circuito A para ser simulado. Este circuito apresenta um percurso quase linear com poucas derivações e com a característica de que uma boa parte da carga está concentrada no final do circuito. Este circuito tem comprimento aproximado de 5 km com presença de árvores no seu percurso, fato que contribui ao acontecimento de FAI, seja no caso em que se tenha contato de uma das fases com um galho de árvore ou rompimento de uma das fases ocasionado pela queda de uma árvore ou um galho. Na Figura 3.2 é apresentado o diagrama simplificado do circuito A e na Figura 3.3 é apresentado o percurso do circuito A. Os elementos mostrados na Figura 3.3 correspondem a elementos que se encontram na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Diagrama simplificado do circuito A

Fonte: Adaptado de (Dados da concessionária do Estado de São Paulo).

Figura 3.3 – Percurso do circuito A.

Fonte: Adaptado de (Sinap®).

A simulação do circuito A foi realizada no software ATP. Dados como impedâncias dos trechos, comprimentos, potências das cargas e dados dos transformadores da subestação foram extraídos do sistema de informação geográfica da concessionária (os dados se encontram especificados no Anexo B). A extração dos dados é feita em arquivos com extensão .txt os quais devem ser traduzidos em formato ATP, razão pela qual foi desenvolvido no programa Matlab® um algoritmo de leitura dos arquivos dos dados elétricos

e um algoritmo de conversão desses dados para um arquivo .txt no formato requerido pelo ATP.

Todas as cargas do circuito foram simuladas como cargas concentradas no primário. Como se tem um tempo de viagem da onda menor do que o tempo de passo da simulação ($\Delta T = 1/60 * 512$) é utilizado o modelo de parâmetros concentrados para simular os trechos (ARRILLAGA et al. 2003). Também foi simulado o correspondente transformador de alimentação do circuito primário. No total foram simulados 769 trechos que compõem o circuito A e 104 cargas concentradas no lado do circuito primário.

3.3 Locais dos eventos simulados

A Figura 3.4 mostra os locais dos eventos de FAI, conexão-desconexão de cargas e banco capacitores simulados no circuito A. A escolha da alocação do capacitor foi feita antes ser fornecida pela concessionária a informação apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Locais dos eventos simulados.

Fonte: Adaptado de (Sinap® e Google Earth®).

3.4 Simulação do evento de FAI

O conjunto de dados que compõem a curva Tensão vs. Corrente, que é necessária para o modelo, foi extraído do trabalho desenvolvido por Nakagomi (2006). As equações que estabelecem os valores das resistências apresentadas em 2.5.3 são escritas a seguir:

$$R_1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{v(t)}{i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times (v(t) - v_n)} \quad (3.1)$$

$$R_2 = 989,54e^{-22,45t} \quad (3.2)$$

O objetivo do controle da resistência R_1 é reproduzir a distorção e assimetria existente nos ciclos da corrente da FAI. Para isto, realiza-se o cálculo para cada instante de tempo do valor da resistência em função da tensão de fase existente no ponto de falta. Este cálculo é constituído por dois semiciclos: o semiciclo de subida que é composto pelos valores que definem o aumento da tensão e da corrente, tendo-se para este caso uma derivada positiva da tensão, e o semiciclo de descida que é definido pelos pontos que iniciam no maior valor da tensão e corrente e que vão até os menores valores das grandezas, tendo-se neste caso uma derivada negativa da tensão. Na Figura 3.5 são mostrados em pontos vermelhos os valores que representam a curva ascendente, e em pontos azuis os dados que representam a curva descendente. A interpolação para o cálculo da resistência R_1 é feita da seguinte forma:

- Dada a tensão no ponto de falta $v(t)$, o programa determina em que faixa do gráfico VxI essa tensão se encontra:

$$v_n \leq v(t) < v_{n+1} \quad (3.3)$$

- A corrente correspondente a $i(t)$ é estimada a partir da interpolação:

$$i(t) = i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} (v(t) - v_n) \quad (3.4)$$

- Conhecidos $v(t)$ e $i(t)$, se calcula a resistência $R_1(t)$ como:

$$R_1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (3.5)$$

Figura 3.5 – Curva tensão vs. corrente de uma FAI.

Fonte: (Nakagomi 2006).

O controle da resistência R_2 é feito com a equação envoltória (equação 3.2) proposta em Nakagomi (2006), a qual é calculada para cada instante de tempo da simulação.

O algoritmo que avalia as duas resistências R_1 e R_2 é implementado num bloco só, tendo sido escrito na linguagem Models própria do ATP (ATP Rule Book 1987). As simulações da FAI foram feitas em três nós diferentes do circuito A. A Figura 3.6 mostra a evolução dos sinais de corrente medidos na subestação na presença de uma FAI no final do alimentador. Os gráficos b) e c) da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são uma ampliação da fase A no instante de rompimento do cabo e no instante de contato do cabo. A fase que foi envolvida no evento foi a fase A, o instante de rompimento do cabo aos 2 segundos e o instante de contato do cabo com o solo aos 2,8 segundos.

Figura 3.6 – Evento de FAI no final do circuito A.

Observa-se na Figura 3.6 que a magnitude da corrente da fase A entre 2 e 2,8 segundos evidenciou um comportamento crescente, o qual se deve à equação envoltória que estabelece o valor da resistência R_2 . Depois do instante de 3,2 segundos, o comportamento da corrente da fase A é definido pelo equacionamento que estabelece os valores da resistência R_1 . A Figura 3.7 apresenta uma simulação de FAI do lado da carga com instante de rompimento do cabo aos 2 segundos e instante de contato do cabo com o solo aos 2,8 segundos. O gráfico b) e c) da Figura 3.7 são ampliações da fase A no instante de rompimento do cabo e no instante de contato do cabo com solo.

Figura 3.7 – Evento de FAI do lado da carga no final do circuito A.

A Figura 3.7 evidencia que o incremento em corrente ocasionado pela FAI do lado da carga é imperceptível quando ela acontece no lado da fonte no final do circuito. Este aspecto é referenciado em um dos trabalhos pesquisados (SENGER et al., 2010) e constitui um dos maiores desafios da detecção de FAI.

3.5 Simulação de eventos geralmente presentes na rede elétrica

Eventos como conexão/desconexão de cargas e banco capacitores, são registrados na literatura como eventos que podem confundir um sistema de detecção de FAI, já que eles, assim como as FAI, são eventos que não geram um incremento significativo na corrente. Neste trabalho foram feitas simulações de conexão e desconexão de cargas e de banco de capacitores em diversos pontos do circuito, com diversos valores de potência e tipos de conexões. A Tabela 3.1 mostra as potências das cargas e a potência do banco de capacitores que foram simulados.

Tabela 3.1 – Potências das cargas simuladas.

CARGA	P(kW)	Q(kVAr)	CAPACITOR	Q(kVAr)
1	54	18	1	300
2	48	16	1	450
3	40	15		
4	14	7		
5	10	6		
6	2	0,7		
7	0,9	0,6		
8	0,4	0,2		

Na Figura 3.8 é mostrado o comportamento das correntes medidas na subestação quando se tem o evento de conexão (aos 2 segundos) e desconexão (aos 4 segundos) da carga 1 apresentada na Tabela 3.1. Os quadros que se encontram na parte inferior da Figura 3.8 são ampliações das correntes no instante de conexão da carga e no instante de desconexão da carga.

Figura 3.8 – Evento de conexão e desconexão de carga trifásica no final do circuito.

O evento de conexão de carga mostrado na Figura 3.8 mostrou que o incremento da magnitude em corrente das três fases foi muito mais rápido do que o incremento em magnitude do evento de FAI apresentado na Figura 3.6, o qual corresponde a um evento de FAI no final do circuito.

Na Figura 3.9 é mostrado o comportamento das correntes medidas na subestação de um evento de conexão (aos 2,8 segundos) e desconexão (aos 4 segundos) do banco de capacitores apresentado na Tabela 3.1. Os gráficos b) e c) da Figura 3.9 são uma ampliação das correntes no instante de conexão e instante de desconexão do banco de capacitores.

Figura 3.9 – Evento de conexão e desconexão de um banco de capacitores.

A distorção na forma de onda das correntes e o incremento na magnitude das correntes que é observado na Figura 3.9 não permanece por mais de um ciclo, diferentemente ao que aconteceu na Figura 3.6, onde o evento de FAI afetou por vários ciclos a corrente da fase em falta. O gráfico b) da Figura 3.9 é uma ampliação das correntes no instante de conexão do banco de capacitores.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram realizadas simulações de eventos de conexão/desconexão de cargas, capacitores e eventos de FAI utilizando o modelo de resistências variáveis controladas por TACS. As oscilografias dos eventos de FAI evidenciaram um comportamento ascendente de vários ciclos até alcançar um nível quase estável, característica das FAI observada nas formas de onda reais apresentadas no capítulo 2. Segundo as simulações feitas, tal característica é própria dos eventos de FAI e não se encontra presente nos eventos de conexão/desconexão de cargas nem nos eventos de conexão/desconexão de capacitores.

4 Descrição do sistema de medição utilizado

Este capítulo descreve o sistema de medição que será utilizado para registrar as oscilografias assim como algumas dificuldades presentes na utilização do medidor.

4.1 Sistema de medição e armazenamento de registros oscilográficos

O medidor utilizado neste trabalho é o G4430 BLACKBOX do fabricante Elspec® (Black Box User & Installation Guide, 2013), o qual internamente faz o cálculo das componentes harmônicas das correntes de fase e das componentes de sequência I_0, I_1, I_2 das correntes. Além disso, o medidor tem a capacidade de exportar os dados calculados. O G4430 é um medidor classe A com capacidade de medição contínua e armazenamento da forma de onda de tensão e corrente com resolução de até 1024 amostras por ciclo de 60Hz em tensão. Este equipamento possui memória interna suficiente para armazenar até um ano de medição. Entre as diversas características do medidor se encontram:

- Registro de eventos como flicker, variações de curta duração (sag/swell) e transitórios de até 16 μ s entre outros.
- Precisão de 0,1% na amostragem de até 250kHz.
- Medição de 5 tensões (L1, L2, L3, neutro e terra), 4 correntes (L1, L2, L3 e neutro) e 1 de temperatura (PT-100).
- Medição de energia bi-direcional (consumida e exportada), bem como a demanda ativa, reativa e aparente.
- Medições conforme IEC 61000-4-15 (flicker) e IEC 61000-4-30 (harmônicos) ou ciclo a ciclo.
- Teste de compatibilidade com EN50160 ou norma brasileira (PRODIST- ANEEL).
- Exportação de eventos e oscilografias nos formatos mais comuns (PQDIF, IEEE COMTRADE, XML e TXT).

- Servidor WEB embarcado. Visualização das medições pelo próprio navegador padrão.
- Liberdade para comunicação: permite integrar o instrumento com CLPs utilizando as saídas RS-485/422 ou pelo próprio servidor OPC (protocolo aberto) incorporado.

Na Figura 4.1 é apresentado o sistema da Elspec®. Este sistema é composto pelo medidor de qualidade G4430, o software PQSCADA, o qual gerencia a transferência das oscilografias armazenadas no medidor G4430 para uma base de dados SQL, o software Investigator, que funciona como interface de visualização dos dados armazenados na base de dados SQL e uma aplicação Web Interface que permite realizar configurações do medidor via internet.

Figura 4.1 – Sistema da Elspec®.

Fonte: Adaptado de (SMX-0602-0100 G4K User & Installation Guide).

O medidor conta com o software de gestão PQSCADA®, com a finalidade de administrar e organizar todas as informações armazenadas no G4430. O PQSCADA® descarrega as informações armazenadas no G4430 em pacotes com formato PQZip, próprio da Elspec®, fazendo posteriormente a descompressão dos pacotes e armazenando-os numa base de dados SQL que é gerenciada pelo próprio PQSCADA®.

4.1.1 Dificuldades na utilização do medidor

No estudo da extração dos dados armazenados na base de dados SQL administrada pelo PQSCADA®, foram identificados alguns problemas com relação a retardos de tempo do

gerenciador PQSCADA® que dificultam a extração de dados. A seguir são listadas as dificuldades identificadas.

- O tempo mínimo de espera para solicitar dados de medições é de 5 minutos, o que quer dizer que não é possível ter tempos de detecção de eventos menores a 5 minutos pela indisponibilidade dos dados. Na Figura 4.2 é exemplificada a dificuldade exposta.

Figura 4.2 – Tempo mínimo de disponibilidade de dados.

Fonte: Adaptado de (SMX-0602-0100 G4K User & Installation Guide).

- A solicitação de dados amostrados com uma taxa de 512 amostras por ciclo de 60Hz ($F_s = 60 * 512 = 30720\text{Hz}$) são volumes de dados de difícil transporte pelo protocolo XML. Os testes de requisição de dados feitos em C++ mostraram que os tempos obtidos para resposta e chegada dos correspondentes dados de um minuto de oscilografia dos seis sinais (3 tensões e 3 correntes) de um medidor só, demoraram aproximadamente 2 minutos. Na Figura 4.3 é exemplificada a dificuldade exposta.

Figura 4.3 – Dificuldade com o transporte de quantidades grandes de dados.

Fonte: Adaptado de (PQS User Manual SMX-0619-0102).

A dificuldade apresentada na Figura 4.3 consiste no limite mínimo de tempo de requisição de dados que é possível obter com o hardware utilizado para o teste. Além dos 2 minutos necessários para trazer os dados, deve-se considerar o tempo que é gasto no processamento da metodologia proposta, o qual indica um tempo adicional de atraso da saída do sistema.

4.2 Análise de cálculos realizados pelo medidor G4430

As oscilografias e harmônicas analisadas correspondem ao intervalo de medição 10/01/2014 – 14/01/2014, intervalo onde aconteceu um evento de rompimento de condutor, segundo consta no relatório de ocorrências providenciado pela concessionária.

4.2.1 Considerações iniciais

Todas as medições de oscilografias que são feitas pelo G4430 assim como os cálculos de harmônicas, sequências, etc., se encontram armazenadas numa base de dados gerenciada pelo PQSCADA®. Para poderem ser realizadas as análises dos dados armazenados, é preciso extraí-los da base de dados.

As oscilografias correspondentes ao intervalo de tempo em análise foram extraídas utilizando uma rotina feita na linguagem C++, a qual faz a requisição das oscilografias em

intervalos de tempo de dez segundos, tendo-se que para um minuto é preciso realizar 6 requisições. O tamanho aproximado do conjunto de oscilografias de um dia de medição é de aproximadamente 63,5GB, tendo-se que para os sete dias de análise se tem um conjunto de 442,7GB. Foram extraídas as oscilografias de corrente e tensão das três fases com uma taxa de amostragem de 512 amostras por ciclo (60Hz).

Fazendo uso dos dados de oscilografias extraídos, foi feito em Matlab® o cálculo das harmônicas (até a harmônica 50) das correntes, sequências das correntes e a THD das correntes a cada ciclo de oscilografia. Foram utilizados também os cálculos de harmônicas (até a harmônica 50) das correntes, sequências das correntes e a THD das correntes feitas pelo G4430. Para extrair os dados calculados pelo G4430 foram feitas requisições no intervalo de tempo em análise, utilizando-se uma rotina desenvolvida em Matlab®, a qual faz 8 requisições em paralelo para assim agilizar a extração dos dados. Na Figura 4.4 é apresentado o esquema do processo de requisições e cálculos.

Figura 4.4 – Esquema do processo de requisição e cálculo de dados.

No esquema da Figura 4.4, o bloco “PROGRAMA C++”, faz a extração das oscilografias e as armazena na pasta “Dados Oscilografia G4430”. Em sequência, os dados desta pasta são acessados pelo bloco “PROGRAMA Matlab® 2”, o qual realiza a TF das correntes, cálculos de THD das correntes e cálculos de sequências das correntes. Os resultados destes cálculos são armazenados na pasta “Dados Calculados Matlab®”. O bloco “PROGRAMA Matlab® 1”

faz a extração dos dados cálculos pelo G4430 e os armazena na pasta “Dados Calculados G4430”.

4.2.2 Análise das correntes harmônicas de ordem 2, 12 e 14

Na Figura 4.5 são apresentadas as correntes harmônicas de ordem 2, 12 e 14 (i_{h_2} , $i_{h_{12}}$, $i_{h_{14}}$) calculadas pelo G4430 para um intervalo de tempo de 6 horas (10/01/2014 00h – 10/01/2014 06h), bem como os limiares $i_{h_{ref}x}$, os quais correspondem ao valor médio da corrente harmônica de ordem x num tempo de 10 segundos.

Figura 4.5 – Correntes harmônicas i_{h_2} , $i_{h_{12}}$, $i_{h_{14}}$ calculadas pelo G4430 no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:00m – 10/01/2014 06h:00m).

Segundo o apresentado na Figura 4.5, os valores de $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ se mantiveram iguais a zero no intervalo de tempo analisado. Diferente ao apresentado por $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$, evidencia-se a partir da Figura 4.5, que i_{h_2} apresenta 4 valores diferentes de zero. Uma análise com mais detalhe da i_{h_2} , mostra que na realidade, 146 valores da i_{h_2} ultrapassaram o limiar $i_{h_{ref}}$. Na Figura 4.6 apresenta-se com mais detalhe o evento que acontece em 10/01/2014 01h:00m.

Figura 4.6 – Corrente harmônica i_{h_2} calculada pelo G4430 no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:59m:57s:500ms – 10/01/2014 01h:00m:01s:666ms).

O incremento do valor de i_{h_2} apresentado na Figura 4.6 tem uma duração de 66 ciclos. Essa duração poderia indicar o instante em que acontece o evento que afeta i_{h_2} e o instante em que esse evento deixa de afetar i_{h_2} . Neste trabalho foram consideradas como eventos as variações em magnitude que ultrapassam o limiar $i_{h_{ref}}$ e tem uma derivada positiva no mesmo instante de ultrapassagem do limiar.

Um estudo mais extenso do comportamento das correntes harmônicas em estudo, calculadas pelo G4430, mostra que as correntes harmônicas em estudo registram uma porcentagem baixa de eventos, o que sugere que se tem uma baixa taxa de eventos no circuito que afetam i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$. Na Tabela 4.1 é apresentado o número de eventos registrados em i_{h_2} , $i_{h_{12}}$, e $i_{h_{14}}$ em diversos intervalos de tempo.

Tabela 4.1 – Número de eventos em i_{h_2} , $i_{h_{12}}$, $i_{h_{14}}$ calculadas pelo G4430 em diversos intervalos de tempo.

Intervalo de Análise	Número de Eventos		
	i_{h_2}	$i_{h_{12}}$	$i_{h_{14}}$
10/01/2014 00h – 10/01/2014 03h	2	0	0
10/01/2014 00h – 10/01/2014 06h	4	0	0
10/01/2014 00h – 11/01/2014 00h	30	0	0
10/01/2014 00h – 14/01/2014 00h	501	26	19

Contrário aos cálculos de i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ feitas pelo G4430 e apresentados na Figura 4.5, os cálculos feitos no Matlab®, mostram que no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:00m – 10/01/2014 06h:00m), i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ tem valores médios diferente a zero e apresentam uma maior quantidade de eventos. Na Figura 4.7 são apresentadas i_{h_2} , $i_{h_{12}}$, $i_{h_{14}}$ e os limiares $i_{h_{ref}}$ calculados no Matlab®.

Figura 4.7 – Correntes harmônicas i_{h_2} , $i_{h_{12}}$, $i_{h_{14}}$ calculadas pelo Matlab® no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:00m – 10/01/2014 06h:00m).

Na Figura 4.7 se evidencia uma quantidade alta de eventos que afetaram i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$, diferente ao que acontece na Figura 4.5, onde só foram detectados 4 eventos e só registrados em i_{h_2} . A Figura 4.8 apresenta com mais detalhe o instante de acontecimento dos eventos que afetam i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ num segundo de oscilografia.

Figura 4.8 – Correntes harmônicas i_{h_2} , $i_{h_{12}}$, $i_{h_{14}}$ calculadas pelo Matlab® no intervalo de tempo (10/01/2014 00h:00m:00s – 10/01/2014 06h:00m:01s).

Na Figura 4.8 se observa a existência de uma maior quantidade de eventos que afetam i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$. Para um segundo de oscilografia, o que corresponde a 600 ciclos, i_{h_2} registrou 56 eventos, $i_{h_{12}}$ registrou 66 eventos e $i_{h_{14}}$ registrou 66 eventos.

Também é realizado para a i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ calculadas em Matlab® um estudo mais extenso, o qual mostra que as correntes harmônicas em estudo registram uma porcentagem mais alta de valores diferentes de zero do que o apresentado pelas harmônicas calculadas pelo G4430, o que sugere que se tem uma alta taxa de eventos que afetam i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$. Na Tabela 4.2 são apresentadas as quantidades de eventos para i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ em diversos intervalos de tempo.

Tabela 4.2 – Número de eventos na i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ calculadas pelo Matlab® em diversos intervalos de tempo.

Intervalo de Análise	Número de Eventos		
	i_{h_2}	$i_{h_{12}}$	$i_{h_{14}}$
10/01/2014 00h – 10/01/2014 03h	88817	106217	109042
10/01/2014 00h – 10/01/2014 06h	152310	182521	187483
10/01/2014 00h – 11/01/2014 00h	654627	794110	812623
10/01/2014 00h – 14/01/2014 00h	2703774	3151782	3269220

A comparação da Figura 4.5 e Figura 4.8 mostra que as correntes harmônicas calculadas pelo medidor G4430 e as correntes harmônicas calculadas pelo Matlab® apresentam diferenças significativas, diferenças que se refletem na quantidade de eventos que são detectados em cada uma das correntes harmônicas.

4.2.3 Comportamento das correntes harmônicas de ordem 2, 12 e 14 calculadas pelo G4430

A i_{h_2} não apresentou nenhum comportamento que estivesse associado ao dia da semana. Embora se tenham dias da semana com uma maior quantidade de eventos, todos os dias apresentaram valores de i_{h_2} iguais ao zero na maior parte do tempo analisado. Comportamento diferente se observa na i_{h_3} , a qual apresenta valores médios diferentes de zero e com um comportamento variante ao longo do dia. Na Figura 4.9,

Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 são apresentados os comportamentos de i_{h_2} e i_{h_3} nos dias da semana (10/01/2014 – 17/01/2014).

Figura 4.9 – Comportamento da i_{h2} e i_{h3} no 10/01/2014 (sexta-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.10 – Comportamento da i_{h2} e i_{h3} no 11/01/2014 (sábado).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.11 – Comportamento da i_{h_2} e i_{h_3} no 12/01/2014 (domingo).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.12 – Comportamento da i_{h_2} e i_{h_3} no 13/01/2014 (segunda-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.13 – Comportamento da i_{h2} e i_{h3} no 14/01/2014 (terça-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.14 – Comportamento da i_{h2} e i_{h3} no 15/01/2014 (quarta-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.15 – Comportamento da i_{h_2} e i_{h_3} no 16/01/2014 (quinta-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Na Figura 4.9,

Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 a i_{h_3} são apresentados comportamentos associados ao horário do dia, como se observa no intervalo de tempo das 3h às 6h, onde h_3 tem seu valor mais baixo com a presença de alguns eventos. Nas situações em que i_{h_3} apresentou valores maiores, que diferem muito do padrão de comportamento da corrente harmônica, i_{h_2} apresentou também variações em magnitude, o que indicaria que aqueles eventos que afetam de forma considerável a i_{h_3} também afetam a i_{h_2} .

A $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ também têm valores iguais a zero a maior parte do tempo que, como com h_2 , não apresentam comportamentos associados ao horário do dia ou dia da semana. Na Figura 4.16 é apresentado o comportamento da i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ para um período de tempo de dois meses.

Figura 4.16 – Comportamento da i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ no intervalo de tempo 10/01/2014 - 10/03/2014 (2 meses).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Segundo a Figura 4.16, ocorreram eventos que afetaram i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ de forma simultânea. Também é possível observar na Figura 4.16 a existência de eventos que só afetam duas harmônicas.

4.2.4 Análise de outras correntes harmônicas calculadas pelo G4430 para propósito de detecção de eventos

Como apresentado em 4.2.2, a utilização dos cálculos feitos pelo medidor G4430 para detectar os eventos que afetam i_{h_2} , $i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$, tem serias limitações na quantidade de eventos a serem detectados. Devido ao problema exposto anteriormente, foram estudadas outras correntes harmônicas calculadas pelo G4430 (até a harmônica 50), com o propósito de determinar a existência de correntes harmônicas que registrem uma maior quantidade de eventos.

Para um tempo de análise de 6 horas (10/01/2014 00h:00m – 10/01/2014 06h:00m), só as correntes harmônicas de ordem 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 23, 25 e 31 (i_{h_7} , i_{h_9} , $i_{h_{11}}$, $i_{h_{13}}$, $i_{h_{15}}$,

$i_{h_{17}}, i_{h_{19}}, i_{h_{23}}, i_{h_{25}}, i_{h_{31}}$) apresentam variações, e as componentes restantes tem valores iguais a zero. Foi feito para as correntes harmônicas com variações um estudo mais extenso que apresenta a quantidade de eventos que são detectados nestas correntes harmônicas em diversos intervalos de tempo. Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados.

Tabela 4.3 – Número de eventos na $i_{h_7}, i_{h_9}, i_{h_{11}}, i_{h_{13}}, i_{h_{15}}, i_{h_{17}}, i_{h_{19}}, i_{h_{23}}, i_{h_{25}}$ e $i_{h_{31}}$ calculadas pelo G4430 em diversos intervalos de tempo.

Intervalo de Análise	Número de Eventos									
	i_{h_7}	i_{h_9}	$i_{h_{11}}$	$i_{h_{13}}$	$i_{h_{15}}$	$i_{h_{17}}$	$i_{h_{19}}$	$i_{h_{23}}$	$i_{h_{25}}$	$i_{h_{31}}$
10/01/2014 00h – 10/01/2014 03h	13	2	11	4	1	3	3	3	3	0
10/01/2014 00h – 10/01/2014 06h	27	5	23	8	1	6	6	6	6	1
10/01/2014 00h – 11/01/2014 00h	100	23	90	31	8	22	23	22	21	6
10/01/2014 00h – 14/01/2014 00h	3924	469	2880	821	42	110	105	81	75	44

As correntes harmônicas de ordem par calculadas pelo G4430 até a harmônica 50, excluindo $i_{h_2}, i_{h_{12}}$ e $i_{h_{14}}$ não registraram eventos no tempo analisado. Estes resultados, assim como os resultados apresentados em Tabela 4.2, permitem concluir que do total de 50 correntes harmônicas calculadas pelo G4430, só 14 poderiam ser utilizadas para detecção de eventos. Uma maior quantidade de eventos foi obtida utilizando-se $i_{h_2}, i_{h_7}, i_{h_9}, i_{h_{11}}$ e $i_{h_{13}}$.

4.2.5 Comportamento da $i_{h_7}, i_{h_9}, i_{h_{11}}, i_{h_{13}}, i_{h_{15}}, i_{h_{17}}, i_{h_{19}}, i_{h_{23}}, i_{h_{25}}$ e $i_{h_{31}}$ calculadas pelo G4430

O estudo da $i_{h_7}, i_{h_9}, i_{h_{11}}, i_{h_{13}}, i_{h_{15}}, i_{h_{17}}, i_{h_{19}}, i_{h_{23}}, i_{h_{25}}$ e $i_{h_{31}}$ mostra que seu comportamento é bem similar ao comportamento de h_2 . Estas componentes, excluindo i_{h_7} , também têm valores iguais a zero a maior parte do tempo que, como com i_{h_2} , não apresentam comportamentos associados ao horário do dia ou dia da semana. Na Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20 são apresentados os comportamentos da $i_{h_7}, i_{h_9}, i_{h_{11}}, i_{h_{13}}, i_{h_{15}}, i_{h_{17}}, i_{h_{19}}, i_{h_{23}}, i_{h_{25}}$ e $i_{h_{31}}$ para um dia de medição.

Figura 4.17 – Comportamento da i_{h7} , i_{h9} , i_{h11} no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.18 – Comportamento da i_{h13} , i_{h15} , i_{h17} no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.19 – Comportamento da i_{h19} , i_{h23} , i_{h25} no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Figura 4.20 – Comportamento da i_{h31} no intervalo de tempo 10/01/2014 - 11/01/2014 (1 dia – sexta-feira).

Fonte: Obtido com (Investigator®).

Na Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20 se observa, como aconteceu na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, eventos que afetam de forma simultânea várias das correntes harmônicas estudadas.

Ao juntarem-se as informações sobre detecções de eventos nas correntes harmônicas estudadas, é possível ter uma melhor identificação de todos os eventos que afetaram o circuito A, no intervalo de tempo em estudo. O número total de eventos que podem ser identificados deve ser igual ou menor do que a totalidade de eventos registrados por $i_{h_7}, i_{h_9}, i_{h_{11}}, i_{h_{13}}, i_{h_{15}}, i_{h_{17}}, i_{h_{19}}, i_{h_{23}}, i_{h_{25}}$ e $i_{h_{31}}$.

4.3 Considerações Finais

As diferenças entre os cálculos de Matlab® e os cálculos do G4430, podem estar relacionadas ao estabelecimento de um parâmetro dentro do medidor que limita a detecção de variações nas correntes harmônicas. Se a mudança das correntes harmônica é maior do que uma porcentagem preestabelecida, o medidor registra a variação. Assim, o medidor só armazena aqueles valores que cumprem com a condição e os instantes em que eles acontecem, característica que permite uma compactação dos dados, já que no momento da extração das correntes harmônicas, os valores daqueles instantes que não foram armazenados são estabelecidos a partir daqueles valores que sim foram registrados. Tal característica do G4430 faz com que não sejam registradas todas as variações que acontecem nas correntes harmônicas, limitando-se assim a detecção de eventos no circuito utilizando as correntes harmônicas calculadas pelo medidor. É de se destacar também que as correntes harmônicas calculadas pelo G4430, no tempo analisado, apresentaram uma taxa muito baixa de variações, contrário ao que foi detectado utilizando os cálculos feitos no Matlab®.

Desta forma, a utilização dos dados calculados pelo medidor G4430 impossibilita a detecção de todos os eventos no circuito. Eventos que não geram conteúdo harmônico que ultrapasse o limiar de cálculo do G4430, como podem acontecer com alguns casos de FAI, ficam dentro do conjunto daqueles eventos que não podem ser detectados. Devido à dificuldade exposta, se faz necessária a utilização das formas de onda capturadas pelo medidor e processadas pelo Matlab® ao invés do próprio medidor.

Neste trabalho serão utilizadas as formas de onda das correntes I_a , I_b , e I_c com uma taxa de amostragem de 128 amostras por ciclo de 60Hz, o que possibilita implementar algoritmos de detecção de FAI baseados em cálculos a cada ciclo e algoritmos de detecção de FAI que requerem as formas de onda.

5 Proposta de metodologias de detecção de FAI

Neste capítulo serão propostas duas novas metodologias de detecção de FAI. Segundo observado no capítulo 3, o comportamento crescente da magnitude da corrente no início do evento até um nível quase estável é próprio de FAI. A primeira metodologia de detecção se propõe a identificar esta característica da FAI utilizando os dados das componentes harmônicas, de sequência positiva, de sequência zero, de sequência negativa e a distorção harmônica total (THD) das correntes de fase, calculadas a cada ciclo de 60Hz.

A segunda metodologia baseia-se na existência de um incremento da energia presente na fase em falta durante o evento de FAI. Esta característica é procurada por vários dos algoritmos apresentados na revisão da literatura. A etapa de disparo (*triggering*) do algoritmo assim como a etapa de extração de indicadores é baseada nos incrementos de energia presentes nas correntes de fase.

Na Figura 5.1 é apresentado o desenho esquemático da implementação das metodologias de detecção propostas.

Figura 5.1 – Desenho esquemático da implementação das metodologias de detecção.

Fonte: Adaptado de (SMX-0602-0100 G4K User & Installation Guide).

Os MQE G4430 instalados em uma subestação são gerenciados pelo software PQSCADA Management Studio, o qual faz a extração dos dados armazenados no medidor e os armazena numa base de dados SQL. Os dados necessários pela primeira metodologia são calculados a partir das formas de onda extraídas da base de dados.

Tanto o PQSCADA Management Studio como as metodologias propostas são implementados e executados de forma simultânea no servidor HP. Neste trabalho não será feita a implementação em tempo real da metodologia proposta.

5.1 Metodologia 1

A primeira metodologia de detecção proposta baseia-se nos dados das componentes harmônicas das correntes, bem como correntes de sequências positiva, negativa e zero, os quais devem ser calculados a cada ciclo. A metodologia foi concebida com o propósito de identificar a característica de *Buildup* descrita em 2.1.3. Na Figura 5.2 é apresentada a metodologia proposta.

Figura 5.2 – Diagrama de blocos da metodologia proposta.

5.1.1 Bloco de detecção

O objetivo deste bloco é fazer uma detecção de um provável evento de FAI, fazendo uso dos dados das componentes harmônicas das correntes e sequências (I_0, I_1, I_2 ,) das correntes calculadas a cada ciclo (60Hz). Internamente, o bloco é constituído por um algoritmo de detecção de eventos, seguido de um algoritmo de cálculo de indicadores para os eventos detectados e um bloco de decisão baseado nestes indicadores, o qual permite identificar se o evento detectado pelo algoritmo inicial é ou não um possível evento de FAI. A seguir é apresentado o diagrama do bloco de detecção na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Bloco de detecção.

5.1.2 Algoritmo 1

Este algoritmo tem como propósito identificar eventos no SD. Para isto, o algoritmo utiliza os dados das correntes harmônicas de ordem 2, 12 e 14, respectivamente calculadas a cada ciclo. O algoritmo faz a análise das correntes harmônicas a cada 10 segundos. Um evento é sinalizado pelo algoritmo quando são atendidas as seguintes condições:

$$abs(i_{f,h_k}(x) - iref_{h_k}) > ith_{h_k} \quad (5.1)$$

$$\frac{di_{f,h_k}(x)}{dt} > 0 \quad (5.2)$$

A condição (5.1) e a condição (5.2) se devem cumprir no mesmo instante de tempo. Onde $i_{f,h_k}(x)$ é o valor da corrente harmônica de ordem k (2, 12, 14) da fase f (a, b, c) no ciclo x , $iref_{h_k}$ é o valor médio da corrente harmônica de ordem k na janela de tempo de 10 segundos, ith_{h_k} é o valor limite da corrente harmônica de ordem k e $\frac{di_{f,h_k}(x)}{dt}$ é a derivada da corrente harmônica de ordem k da fase f no ciclo x .

Se o valor da corrente harmônica $i_{f,h_k}(x)$ cumpre a condição anterior, a posição em ciclos (x) do evento é armazenada.

Considerações sobre o cálculo de ith_{h_k}

O valor ith_{h_k} permite ter um controle da sensibilidade de detecção de eventos do bloco de detecção. Este valor deve ser ajustado para cada harmônica de entrada do bloco de detecção, já que, cada harmônica tem seu próprio comportamento. O ajuste em zero de ith_{h_k} , por exemplo, aumentaria a quantidade de eventos detectados pelo bloco de detecção e, por

consequente aumentaria o processamento necessário para analisar cada um dos eventos. Um ajuste muito alto de ith_{h_k} faria com que o bloco de detecção não conseguisse detectar nenhum evento.

No caso de serem utilizadas as correntes harmônicas calculadas pelo Matlab® como entradas do bloco de detecção de eventos, deve-se ter cuidado no estabelecimento de ith_{h_k} . Se o valor ith_{h_k} for muito pequeno, resulta uma quantidade alta de eventos detectados por segundo. Para a corrente harmônica $i_{h_{14}}$, se tem uma média de 9 casos por segundo, segundo o apresentado na Tabela 4.2. É por esta razão que é aplicado neste trabalho o cálculo de ith_{h_k} baseado no valor de $iref_{h_k}$ em janelas de 10 segundos. Assim, para cada janela é calculado $iref_{h_k}$ como a média das correntes harmônicas nessa janela resultando ith_{h_k} como:

$$ith_{h_k} = iref_{h_k} * A \quad (5.3)$$

Onde A é uma variável multiplicadora de $iref_{h_k}$. Para esta variável, adota-se valores diferentes, dependendo da ordem da corrente harmônica que serve como entrada do bloco de detecção.

Limitações na detecção

A detecção utilizando o presente método para sinais reais possui limitações em casos em que o circuito em estudo tem níveis consideráveis de correntes harmônicas. Eventos de baixa corrente eficaz e que acontecem no final do circuito não poderiam ser detectados efetivamente, pois as correntes harmônicas geradas estariam abaixo do nível de magnitude de correntes harmônicas das cargas presentes no circuito. Este caso é um bom exemplo do que possivelmente poderia acontecer numa situação de FAI do lado da carga no final do circuito.

5.1.3 Bloco de cálculo de indicadores

Uma vez que se tem o vetor dado pelo algoritmo 1, com as possíveis posições em ciclos dos eventos, são calculados indicadores para cada posição os quais são posteriormente analisados pelo bloco de decisão. Os 12 indicadores aqui definidos como 1, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 15, 17 e 19 têm o propósito de medir, respectivamente, as variações em magnitude de $THDi_f$ (distorção harmônica total da corrente de fase f), I_0 , I_1 , I_2 , i_{f,h_1} , i_{f,h_3} , i_{f,h_5} , i_{f,h_7} , $i_{n_{h_1}}$, $i_{n_{h_3}}$, $i_{n_{h_5}}$, $i_{n_{h_7}}$ (onde $i_{n_{h_k}}$ é a corrente harmônica de ordem k da corrente de

neutro) ocasionadas pelo evento de FAI nos primeiros m ciclos depois da detecção do evento com respeito aos m ciclos antes da ocorrência do evento. Outros 8 indicadores 2, 7, 9, 11, 14, 16, 18 e 20 procuram determinar o comportamento de I_0 , I_1 , I_2 , i_{f,h_1} , i_{f,h_3} , i_{f,h_5} , i_{n,h_1} , i_{n,h_3} , i_{n,h_5} , i_{n,h_7} nos m ciclos seguintes ao evento de FAI.

1. Variação da distorção harmônica ($\Delta THDi_f$): É calculada a média dos m ciclos antes do evento e a média dos m ciclos depois do evento da $THDi_f$. Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais, o indicador é imposto igual a 0.
2. Derivada da distorção harmônica depois do evento $\left(\frac{dTHDi_f}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se $THDi_f$ nesses pontos apresentou valores crescentes ($\nearrow$), decrescentes ($\searrow$), ou variáveis (os m pontos não são crescentes nem decrescentes)
3. Variação da componente fundamental da corrente ($\Delta i_{f,h_1}$): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da i_{f,h_1} . Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
4. Derivada da componente fundamental da corrente depois do evento $\left(\frac{di_{f,h_1}}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se i_{f,h_1} nesses pontos apresenta valores crescentes, decrescentes ou variáveis.
5. Variação da terceira corrente harmônica ($\Delta i_{f,h_3}$): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da i_{f,h_3} . Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
6. Derivada da terceira corrente harmônica depois do evento $\left(\frac{di_{f,h_3}}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se i_{f,h_3} nesses pontos apresenta valores crescentes, decrescentes ou variáveis.
7. Variação da quinta corrente harmônica ($\Delta i_{f,h_5}$): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da i_{f,h_5} . Se a média depois do evento

for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.

8. Derivada da quinta corrente harmônica depois do evento $\left(\frac{di_{f,h_5}}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se i_{f,h_5} nesses pontos apresenta valores crescentes, decrescentes ou variáveis.
9. Variação da sétima corrente harmônica ($\Delta i_{f,h_7}$): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da i_{f,h_7} . Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
10. Variação de sequência zero (Δi_0): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento. Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
11. Variação de sequência positiva (Δi_1): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento. Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
12. Variação da sequência negativa (Δi_2): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento. Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
13. Variação da componente fundamental da corrente de neutro (I_n) ($\Delta i_{n_{h_1}}$): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da $i_{n_{h_1}}$. Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
14. Derivada da componente fundamental da I_n depois do evento $\left(\frac{di_{n_{h_1}}}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se $i_{n_{h_1}}$ nesses pontos apresenta valores crescentes, decrescentes ou variáveis.

15. Variação da terceira corrente harmônica da I_n (Δi_{nh_3}): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da i_{nh_3} . Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
16. Derivada da terceira corrente harmônica da I_n depois do evento $\left(\frac{di_{nh_3}}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se a i_{nh_3} nesses pontos apresenta valores crescentes, decrescentes ou variáveis.
17. Variação da quinta corrente harmônica da I_n (Δi_{nh_5}): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da i_{nh_5} . Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
18. Derivada da quinta corrente harmônica da I_n depois do evento $\left(\frac{di_{nh_5}}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se a i_{nh_5} nesses pontos apresenta valores crescentes, decrescentes ou variáveis.
19. Variação da sétima corrente harmônica da I_n (Δi_{nh_7}): É calculada a média dos m valores antes do evento e a média dos m valores depois do evento da i_{nh_7} . Se a média depois do evento for maior do que a média antes do evento, o indicador é imposto igual a 2, caso contrario é imposto igual a 1. No caso de serem as médias iguais o indicador é imposto igual a 0.
20. Derivada da sétima corrente harmônica da I_n depois do evento $\left(\frac{di_{nh_7}}{dt_{depois}}\right)$: É calculada a derivada dos m pontos depois do evento para determinar se a i_{nh_7} nesses pontos apresenta valores crescentes, decrescentes ou variáveis.

5.1.4 Bloco de decisão sobre os indicadores

Este último bloco tem como propósito implementar uma metodologia de classificação, a qual terá como entrada os indicadores calculados no bloco anterior. O bloco deve classificar o evento detectado pelo algoritmo 1 em eventos de FAI ou demais eventos.

Como metodologia de classificação, foi implementada uma RNA supervisionada sem realimentação “*feed-forward back propagation*” com função de ativação tangente sigmoide nas camadas ocultas, a qual terá como entrada os indicadores do bloco de cálculo de indicadores. Esta técnica de inteligência artificial tem sido utilizada na extração de padrões de eventos de faltas de alta impedância, baixa impedância e assim como outros distúrbios da qualidade da energia. Nesta última área, muitos distúrbios precisam ser reconhecidos e separados para análise, como se destaca em Vega et al. (2008).

5.2 Metodologia 2

A segunda metodologia de detecção proposta baseia-se na aplicação da transformada wavelet (TW) na forma de onda das correntes de fase e neutro I_a, I_b, I_c, I_n .

5.2.1 Algoritmo de disparo

Para detectar possíveis eventos de FAI é realizado o cálculo da energia (ξ) contida nos coeficientes de detalhe da TW. Segundo Costa et al. (2008), o cálculo da ξ na escala j pode ser efetuado usando uma janela móvel que se movimenta através das amostras, movimentando-se um coeficiente por vez segundo a seguinte equação:

$$\xi_j(k) = \sum_{n=k}^{k+\frac{\Delta k_{ciclo}}{2}} d_j^2(n) \quad (5.4)$$

Onde Δk_{ciclo} é o número de amostras por ciclo de 60Hz do sinal analisado. A faixa de frequências na qual serão procuradas mudanças na ξ abarca as frequências cobertas pelo coeficiente de detalhe d_1 (1920Hz a 3840Hz), pelo qual j é estabelecido em 1. Segundo Lopes et al. (2013) e Russell et al. (1982), as FAI geram componentes de altas frequências que se

encontram por acima de 2kHz, motivo pelo qual foi escolhido o cálculo da ξ considerando somente o detalhe d_1 .

Se a ξ_1 da amostra k cumpre a seguinte equação, é sinalizado um possível evento de interesse.

$$\xi_1(k) > (1 + \eta) * \max\{\xi_{past}\} \quad (5.5)$$

Onde ξ_{past} é o conjunto das ξ antes da amostra k . O tamanho do ξ_{past} é igual a:

$$npast * \frac{\Delta k_{ciclo}}{2} \quad (5.6)$$

Onde $npast$ é o número de ciclos que serão considerados para o tamanho de ξ_{past} . Baseado em estudos do comportamento do equacionamento anterior com sinais reais do circuito A, foram estabelecidos os seguintes valores para as constantes: $\eta = 0,7$ e $npast = 600$. O valor de η permite ter um controle da sensibilidade do algoritmo de disparo. Para valores de $0 < \eta < 0,4$, o algoritmo pode detectar uma maior quantidade de eventos, e para valores de $n > 0,7$, só serão detectados aqueles eventos que geram quantidades consideráveis de energia na faixa de frequências coberta pelo detalhe d_1 . A quantidade de energias contidas no conjunto ξ_{past} permite ter um controle da proximidade entre os eventos detectados. Se existirem dois eventos com proximidade menor que $npast$, só é dado o sinal de disparo para o evento que tiver a maior energia e atenda a equação 5.5. No caso em que o sistema não apresenta nenhum tipo de evento durante vários segundos, são obtidas quantidades de energia com poucas variações na operação $\max\{\xi_{past}\}$. Assim quando se apresentarem eventos que geram quantidades de energia que atendem a equação 5.5, o algoritmo de disparo acusará automaticamente o evento.

Na segunda parte do algoritmo de disparo é realizada uma filtragem dos possíveis eventos de interesse. Esta filtragem classificara os eventos segundo a quantidade de fases afetadas. A sequência lógica da classificação é apresentada a seguir:

- Para cada evento de interesse é calculada a variação da magnitude de corrente das fases I_a , I_b e I_c segundo a seguinte equação:

$$\Delta I_f(k) = RMS[I_f(k : \Delta k_{ciclo} * nd)] - RMS[I_f(k - (\Delta k_{ciclo} * nd) : k - 1)] \quad (5.7)$$

Onde f é fase em análise, k a amostra onde foi detectado o evento e nd o número de ciclos considerados para o cálculo de ΔI_f . Neste trabalho nd é estabelecido em 4. Para os eventos de conexão de conexão/desconexão de cargas e capacitores simulados neste trabalho, as correntes conseguiram alcançar magnitudes estáveis de corrente em menos de 3 ciclos. Cálculos de $\Delta I_f(k)$ com valores de nd menores que 4 consideram a magnitude da corrente no estado transitório do evento e não no estado estável do evento.

- Se o ΔI_{RMS} calculado para cada uma das fases for menor que I_{RMS_inf} , o valor de ΔI_{RMS} é estabelecido em zero. O valor I_{RMS_inf} estabelece um limite mínimo de corrente que permite descartar aqueles eventos para os quais não se pode assegurar certeza na classificação. Neste trabalho I_{RMS_inf} é estabelecido em 5A.
- Para o caso de detecção de FAI só serão de interesse aqueles eventos que forem classificados como conexão monofásica e comum ΔI_{RMS} na fase afetada não maior a I_{RMS_sup} . O valor de I_{RMS_sup} estabelece um limite superior de corrente que permite descartar aqueles eventos que podem ser de baixa impedância, como é o caso de curtos monofásicos. Neste trabalho I_{RMS_sup} é estabelecido em 150A.

5.2.2 Cálculo de indicadores

Uma vez que se tem detectado e filtrado os possíveis eventos de interesse utilizando o algoritmo de disparo, são calculados dois indicadores, os quais são baseados na TW da forma de onda da fase em falta.

1. É calculado o $\Delta \xi$ na amostra k onde foi detectado o evento de interesse utilizando a seguinte equação:

$$\Delta \xi(k) = \sum_{n=k}^{k + \frac{\Delta k_{ciclo} * nde}{2}} \xi(k) - \sum_{n=k - \frac{\Delta k_{ciclo} * nde}{2}}^{k-1} \xi(k) \quad (5.8)$$

Onde nde é o número de ciclos para o cálculo de $\Delta \xi$. Neste trabalho nde é estabelecido em 2.

2. É calculado o $\Delta\xi_{cc}$ na amostra k onde foi detectado o evento de interesse utilizando a seguinte equação:

$$\Delta\xi_{cc}(k) = \sum_{n=k}^{k+\frac{\Delta k_{ciclo}}{2}*necc} \xi_{cc}(k) - \sum_{n=k-\frac{\Delta k_{ciclo}}{2}*necc}^{k-1} \xi_{cc}(k) \quad (5.9)$$

Onde ξ_{cc} é a energia dos ncc coeficientes de detalhe que se encontram ao redor do ponto de cruzamento por zero da fase analisada e $necc$ é o número de cruzamentos por zero utilizados para o cálculo $\Delta\xi_{cc}(k)$. Neste trabalho ncc é estabelecido em 10 e $necc$ em 10.

5.2.3 Lógica de decisão

A lógica de decisão da metodologia 2 considera a sequência de eventos pela qual se originam as FAI por rompimento de condutor. Primeiro deve-se ter uma detecção de um evento de desconexão de carga monofásica, o qual é devido ao rompimento do condutor. Depois deve-se ter uma detecção de um evento de conexão monofásica na mesma fase em que foi detectado o evento de desconexão monofásica. Segundo os trabalhos Lopes et al. (2013) e Russell et al. (1982), o indicador $\Delta\xi(k)$ deve adotar valores positivos para eventos de FAI. De igual forma o indicador $\Delta\xi_{cc}(k)$ deverá adotar valores positivos, segundo os resultados apresentados em 4.3.

O tempo entre a detecção do evento de desconexão monofásica e a detecção do evento de conexão monofásica (cujos indicadores forem positivos), também deve ser considerado na lógica de decisão. Para redes de distribuição típicas, resultam tempos de queda da ordem de 1,4s (SENGER et al., 2010). Assim, a identificação de uma conexão monofásica com indicadores positivos deve ser antecedida pela identificação de um evento de desconexão monofásica em um tempo não menor a 1,4s.

FAI simuladas em laboratório e FAI obtidas em campo apresentaram aleatoriedades na magnitude da corrente (Massa 2013), motivo pelo qual se espera que existam várias indicações de conexão monofásica depois do instante de início da FAI. Assim, quanto maiores forem as quantidades de conexões monofásicas (com indicadores positivos)

detectadas em um tempo Δt depois da detecção da desconexão monofásica, maior será a probabilidade de acerto da indicação de evento de FAI.

No caso de redes reais, onde as comutações de cargas não lineares injetam energias na faixa de frequências coberta pelo detalhe d_1 , não é suficiente estabelecer que os indicadores sejam positivos para ter-se uma indicação de FAI. É preciso estabelecer limiares para os indicadores com o propósito de garantir a assertividade da metodologia. O estabelecimento de valores acertados para tais limiares só é possível utilizando sinais de FAI para calibração da metodologia de detecção.

Neste trabalho há ainda indisponibilidade de dados reais de FAI para se estabelecer indicadores acertados para esta metodologia. Esforços encaminhados a estabelecer estes limiares utilizando simulações de FAI em ATP não reproduzem as diversas aleatoriedades das FAI nem reproduzem as variações do comportamento dos sinais reais medidos em subestação.

5.2.4 Sequência lógica da metodologia

A metodologia de detecção proposta segue a sequência lógica descrita na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Sequência lógica da Metodologia 2.

A seguir são descritas as etapas da sequência lógica apresentada na Figura 5.4:

1. É calculada a energia $\xi_1(k)$ contida no coeficiente de detalhe d_1 da TW da corrente de neutro I_n .
2. Se a ξ_1 da amostra k cumpre a equação 7.5 é sinalizado um possível evento de interesse. No caso contrario não se tem detecção de eventos.
3. Se realiza a classificação do evento sinalizado na etapa 2 utilizando as correntes de fase I_a, I_b, I_c . Se o evento é classificado como “conexão monofásica” se prossegue com a etapa 4. No caso contrário, o evento é classificado como não FAI.
4. É calculado o $\Delta I_f(k)$. Se $I_{RMS_inf} < \Delta I_f(k) < I_{RMS_sup}$, se prossegue com a etapa 5. No caso de ter-se $\Delta I_f(k) \geq I_{RMS_sup}$ o evento é classificado como não FAI. No caso

- contrário ($\Delta I_f(k) \leq I_{RMS_inf}$) é incrementado o contador de eventos de conexão monofásica com impossibilidade de ser classificados (n_{pFAI}).
5. São calculados os indicadores segundo as equações 7.8 e 7.9. Se o valor dos dois indicadores for maior do que zero é incrementado o contador de eventos de conexão monofásica com probabilidade de ser FAI (n_{FAI}).
 6. Na última etapa deve de ser definida uma lógica baseada na quantidade de n_{FAI} e na quantidade de n_{pFAI} durante um tempo $\Delta t_{decisão}$ para poder se garantir uma correta classificação. O estabelecimento desta lógica precisa de um amplo estudo do comportamento de sinais reais de FAI. Em Masa 2013 foi apresentada uma lógica similar, a qual foi calibrada com sinais reais de FAI.

5.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas duas metodologias de detecção de FAI, as quais foram implementadas em Matlab®.

A primeira metodologia procura características da FAI que se apresentam nos primeiros ciclos de início da FAI. Os indicadores calculados nesta metodologia foram focados na detecção da característica *Buildup*. Estes indicadores apresentam valores lógicos, os quais são utilizados para descrever as variações em magnitude e o comportamento nos m ciclos seguintes ao evento de FAI das correntes harmônicas e correntes sequenciais utilizadas pela metodologia.

A segunda metodologia procura incrementos de energia na faixa de frequências 1920Hz – 3840Hz para detectar FAI. Devido ao estabelecimento de valores numéricos para os indicadores calculados na metodologia 2, se faz necessário implementar uma metodologia de classificação que seja previamente treinada com dados reais de FAI, com o propósito de conhecer as margens de valores entre os quais os eventos podem ser classificados como FAI. A decisão tomada pelo bloco lógico depende da quantidade de eventos de FAI detectados num tempo $\Delta t_{decisão}$.

6 Desempenho das metodologias de detecção com FAI simuladas no ATP

Para avaliar o desempenho das metodologias de detecção propostas foi criado um banco de dados de simulações, o qual contém simulações de FAI e simulações de conexão/desconexão de cargas. A seguir são expostas as características das simulações de FAI.

- FAI do lado da carga e do lado do gerador: Quando se apresentam FAI do lado do gerador, a fase que foi afetada é a fase que percebe a maior quantidade de efeitos da FAI e apresenta uma magnitude de corrente que não depende da carga que se encontra a jusante do ponto de falta (SENGER et al., 2013). Para faltas do lado da carga, as características da FAI são percebidas pelas outras duas fases que não se encontram em falta assim como percebidas também pela corrente de neutro (I_n). Esta última falta é a mais difícil de detectar devido a que se não se tem uma carga mínima a jusante do ponto de falta, a corrente de FAI será quase nula. A Figura 6.1 apresenta um esquema da FAI do lado do gerador e a FAI do lado da carga.

Figura 6.1 – (a) modelo para FAI com contato no lado da fonte, (b) modelo para FAI com contato no lado da carga.

Fonte: Adaptado de (SENGER et al., 2013).

- FAI em diferentes barras do circuito A: Foram escolhidas barras nos ramais do tronco principal assim como barras no tronco principal do circuito A, a diferentes distâncias da subestação. A Figura 6.2 apresenta a localização das barras escolhidas.

Figura 6.2 – Localização das barras escolhidas para simulação da FAI.

Fonte: Adaptado de (Sinap®).

- FAI com diversas impedâncias: A variação da impedância de falta permite ter simulações com diferentes magnitudes de corrente de falta o que ajuda a obter um banco de dados com uma maior diversidade.
- FAI em 4 horários de carregamento do circuito A: As simulações foram feitas nos horários 00:00, 06:00, 10:00, 20:00. Nos horários escolhidos o sistema apresenta carregamentos diferentes conforme o apresentado na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Correntes de fase do circuito A ao longo do dia segundo o Sinap®.

Fonte: Adaptado de (Sinap®).

- FAI nas três fases: Foram feitas simulações nas três fases para observar como os carregamentos das fases afetam a FAI percebida na subestação.

Cada uma das simulações de FAI contém 5 segundos de simulação. Para $t = 1s$ ocorre o rompimento do condutor. Em $t = 2s$ ocorre o contato do cabo com a superfície e, por conseguinte o evento de FAI, evento que permanece até o final da simulação. No total foram gerados 2880 eventos de FAI, conforme ilustrado abaixo:

Barras		Fases		Horários		Impedâncias		Lados		Eventos de FAI	
15	x	3	x	4	x	8	x	2	=	2880	

Barras		Fases		Horários		Impedâncias		Lados		Eventos de rompimento	
15	x	3	x	4	x	8	x	2	=	2880	

Foram também feitas simulações de conexão/desconexão de cargas com diferentes potências no circuito A com as seguintes características:

- Conexão/desconexão de cargas em diferentes barras do circuito A: As barras escolhidas para simulação de conexão/desconexão de cargas são as mesmas barras escolhidas para simular os eventos de FAI.

- Conexão/desconexão de cargas com diferentes potências: A conexão/desconexão de cargas com diferentes potências permitiu criar um banco de dados com boa diversidade de eventos.
- Conexão/desconexão em todas as fases: Foram feitas simulações de conexão/desconexão de cargas com ligações do tipo ABC, AB, BC, CA, AN, BN e CN.
- Conexão/desconexão de cargas em 4 horários de carregamento do circuito A: Os horários escolhidos para simulação de conexão/desconexão de cargas são os mesmos horários escolhidos para simular os eventos de FAI.

Cada uma das simulações de conexão/desconexão de cargas contém 5 segundos de simulação. Em $t = 1s$ ocorre a conexão da carga e em $t = 3s$ ocorre a desconexão da carga. No total foram gerados 3660 eventos, conforme ilustrado a seguir:

Barras		Ligações		Horários		Potencias		Eventos de conexão	
15	x	7	x	4	x	8	=	3360	

Barras		Ligações		Horários		Potencias		Eventos de desconexão	
15	x	7	x	4	x	8	=	3360	

O banco de dados de eventos para teste da metodologia de detecção proposta é constituído por todos os eventos gerados. A Tabela 6.1 apresenta os eventos e as quantidades de eventos que constituem o banco de dados. O rompimento de condutor será referido como “rompimento”, a conexão de carga será referida como “conexão” e a desconexão de carga será referida como “desconexão”.

Tabela 6.1 – Quantidade de eventos do banco de dados de simulações.

Eventos de FAI	Eventos de rompimento	Eventos de conexão	Eventos de desconexão	Total
2880	2880	3360	3360	12480

Para a metodologia 1, foi utilizada uma RNA com duas camadas “*feed-forward back propagation*”, sendo a primeira oculta com função de ativação sigmoide e a outra com neurônios de saída. Esta rede é treinada com o gradiente conjugado escalado e utilizando o 70% do total de eventos simulados. A rede é avaliada com o erro médio quadrático (emq),

utilizando 15% do total de eventos simulados. Os restantes 15% dos eventos simulados são utilizados para o teste final da rede. O número de neurônios da camada de entrada corresponderá ao número de indicadores que são considerados para cada configuração.

6.1 Desempenho da metodologia 1

Cinco configurações da metodologia de detecção foram avaliadas com o propósito de determinar quais delas oferecem melhores resultados na etapa de detecção e na etapa de classificação.

O processo de detecção e classificação é realizado para cada uma das entradas. Se existem diversas entradas, são possíveis obterem-se diversas detecções e classificações. Para o caso das entradas serem *Ia*, *Ib* e *Ic*, pode-se obter na saída no máximo três classificações do mesmo evento. A seguir são listadas as possíveis saídas do classificador:

- Classificação do evento como FAI tem como saída um “2”.
- Classificação do evento como não FAI tem como saída um “1”.
- Classificação do evento como não determinado tem como saída um “0”.
- Não classificação devido à inexistência de detecção tem como saída um NaN.

As classificações da RNA tem uma variação de tolerância na classificação (q) de 0,2. Os resultados das classificações foram organizados da seguinte forma:

- Classe 2 ~ ~: Agrupa os eventos que tiveram uma saída igual a 2, sem importar se as outras saídas foram, 2, 1, 0 ou NaN.
- Classe 2 2 ~: Agrupa os eventos que tiveram duas saídas iguais a 2, sem importar se a outra saída foi 2, 1, 0 ou NaN.
- Classe 2 2 2: Agrupa os eventos que tiveram as três saídas iguais a 2.
- Classe 2 NaN NaN: Agrupa os eventos que foram detectados só por uma fase e sua saída foi igual a 2.
- Classe 1 1 ~: Agrupa os eventos que tiveram duas saídas iguais a 1, sem importar se a outra saída foi 2, 1, 0 ou NaN.
- Classe 1 1 1: Agrupa os eventos que tiveram as três saídas iguais a 1.
- Classe 1 NaN NaN: Agrupa os eventos que foram detectados só por uma fase e sua saída foi igual a 1.
- Classe 0 0 ~: Agrupa os eventos que tiveram duas saídas iguais a 0, sem importar se a outra saída foi 2, 1, 0 ou NaN.

- Classe 0 0 0: Agrupa os eventos que tiveram as três saídas iguais a 0.
- Classe 0 NaN NaN: Agrupa os eventos que foram detectados só por uma fase e sua saída foi igual a 0.

Os indicadores 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 serão referidos como os indicadores das correntes de fase I_a , I_b e I_c . Os indicadores 10, 11 e 12 serão referidos como os indicadores das correntes de sequência I_0 , I_1 , I_2 . Os indicadores 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20 serão referidos como os indicadores da corrente de neutro I_n .

6.1.1 Desempenho da configuração 1

A Figura 6.4 mostra o diagrama da configuração 1.

Figura 6.4 – Diagrama da configuração 1.

Na configuração 1, as entradas são as correntes I_a , I_b e I_c , as quais passam pelo detector de eventos para determinar as possíveis posições no tempo onde se tem eventos. Depois é realizado o cálculo dos indicadores das correntes de fase I_a , I_b , I_c , os indicadores das correntes de sequência I_0 , I_1 , I_2 e os indicadores da I_n . No final, é utilizada a RNA para classificar cada um dos eventos detectados. Na Tabela 6.2 são apresentados os resultados da implementação da configuração 1.

Tabela 6.2 – Resultados da configuração 1.

CLASSES	ROMPIMENTO 1948	FAI 1989	CONEXÃO 3331	DESCONEXÃO 3360
2 ~ ~	0	1984	1	0
2 2 ~	0	951	0	0
2 2 2	0	572	0	0
2 NaN NaN	0	1019	0	0
1 1 ~	1368	0	3013	3271
1 1 1	1146	0	2394	2609
1 NaN NaN	580	2	317	84
0 0 ~	0	0	0	2
0 0 0	0	0	0	0
0 NaN NaN	0	3	0	0

- Dos 2880 eventos de rompimento, 2880 eventos de FAI, 3360 eventos de conexão e 3360 eventos de desconexão, a configuração 1 detectou 1948 eventos de rompimento, 1989 eventos de FAI, 3331 eventos de conexão e 3360 eventos de desconexão.
- Dos 1948 eventos de rompimento detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.
- Dos 1989 eventos de FAI detectados, 99,7% tiveram pelo menos uma saída do classificador como FAI, 47,8% tiveram duas saídas do classificador como FAI, 28,8% tiveram as três saídas do classificador como FAI e 51,2% foram classificados como FAI só por uma fase.
- Dos 3331 eventos de conexão detectados, 0,0003% tiveram pelo menos uma saída do classificador como FAI.
- Dos 3360 eventos de conexão detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.

6.1.2 Desempenho da configuração 2

A Figura 6.5 mostra o diagrama da configuração 2.

Figura 6.5 – Diagrama da configuração 2.

Na configuração 2, as entradas são as correntes I_a , I_b e I_c , as quais passam pelo detector de eventos para determinar as possíveis posições no tempo onde se tem eventos. Depois é realizado o cálculo dos indicadores das correntes de fase I_a , I_b , I_c e o cálculo dos indicadores das correntes de sequência I_0 , I_1 , I_2 . No final, é utilizada a RNA para classificar cada um dos eventos detectados. Na Tabela 6.3 são apresentados os resultados da implementação da configuração 2.

Tabela 6.3 – Resultados da configuração 2.

CLASSES	ROMPIMENTO 1948	FAI 1989	CONEXÃO 3331	DESCONEXÃO 3360
2 ~ ~	0	1720	1	0
2 2 ~	0	827	0	0
2 2 2	0	460	0	0
2 NaN NaN	0	779	0	0
1 1 ~	1368	0	2933	3276
1 1 1	1146	0	2006	2611
1 NaN NaN	580	9	317	84
0 0 ~	0	44	75	0
0 0 0	0	0	0	0
0 NaN NaN	0	236	0	0

- Dos 2880 eventos de rompimento, 2880 eventos de FAI, 3360 eventos de conexão e 3360 eventos de desconexão, a configuração 2 detectou 1948 eventos de rompimento, 1989 eventos de FAI, 3331 eventos de conexão e 3360 eventos de desconexão.
- Dos 1948 eventos de rompimento detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.
- Dos 1989 eventos de FAI detectados, 86,5% tiveram pelo menos uma saída do classificador como FAI, 41,6% tiveram duas saídas do classificador como FAI, 23,1% tiveram as três saídas do classificador como FAI, 39,2% classificados como FAI só por uma fase, 0,004% classificados como não FAI só por uma fase, 0,022% sem classificação por duas fases e 0,11% sem classificação só por uma fase.
- Dos 3331 eventos de conexão detectados, 0,0003% tiveram pelo menos uma saída do classificador como FAI.
- Dos 3360 eventos de conexão detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.

6.1.3 Desempenho da configuração 3

A Figura 6.6 mostra o diagrama da configuração 3.

Figura 6.6 – Diagrama da configuração 3.

Na configuração 3, a entrada é a corrente *In* a qual passa pelo detector de eventos para determinar as possíveis posições no tempo onde se tem eventos. Depois é feito o cálculo dos indicadores das correntes de fase *Ia*, *Ib*, *Ic*, o cálculo dos indicadores das correntes de sequência I_0 , I_1 , I_2 e o cálculo dos indicadores da *In*. No final, é utilizada a RNA para classificar cada um dos eventos detectados. Na Tabela 6.4 são apresentados os resultados da implementação da configuração 3.

Tabela 6.4 – Resultados da configuração 3.

CLASSES	ROMPIMENTO 1755	FAI 1975	CONEXÃO 2760	DESCONEXÃO 2875
2 ~ ~	0	1975	0	0
2 2 ~	0	1973	0	0
2 2 2	0	1961	0	0
2 NaN NaN	0	0	0	0
1 1 ~	1755	0	2760	2875
1 1 1	1755	0	2760	2871
1 NaN NaN	0	0	0	0
0 0 ~	0	1	0	0
0 0 0	0	0	0	0
0 NaN NaN	0	0	0	0

- Dos 2880 eventos de rompimento, 2880 eventos de FAI, 3360 eventos de conexão e 3360 eventos de desconexão, a configuração 3 detectou 1755 eventos de rompimento, 1975 eventos de FAI, 2760 eventos de conexão e 2875 eventos de desconexão.
- Dos 1755 eventos de rompimento detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.

- Dos 1975 eventos de FAI detectados, 100% tiveram pelo menos uma saída do classificador como FAI, 99,9% tiveram duas saídas do classificador como FAI e 99,3% tiveram as três saídas do classificador como FAI.
- Dos 2760 eventos de conexão detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.
- Dos 2875 eventos de conexão detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.

6.1.4 Desempenho da configuração 4

A Figura 6.7 mostra o diagrama da configuração 4.

Figura 6.7 – Diagrama da configuração 4.

Na configuração 4, a entrada é a corrente In a qual passa pelo detector de eventos para determinar as possíveis posições onde se tem eventos. Depois é realizado o cálculo dos indicadores das correntes de fase Ia , Ib , Ic , e o cálculo dos indicadores das correntes de sequência I_0 , I_1 , I_2 . No final, é utilizada a RNA para classificar cada um dos eventos detectados. Na Tabela 6.5 são apresentados os resultados da implementação da configuração 4.

Tabela 6.5 – Resultados da configuração 4.

CLASSES	ROMPIMENTO 1755	FAI 1975	CONEXÃO 2760	DESCONEXÃO 2875
2 ~ ~	0	1972	14	0
2 2 ~	0	1815	0	0
2 2 2	0	1389	0	0
2 NaN NaN	0	0	0	0
1 1 ~	1755	0	2655	2875
1 1 1	1755	0	2247	2867
1 NaN NaN	0	0	0	0
0 0 ~	0	120	102	0
0 0 0	0	3	0	0
0 NaN NaN	0	0	0	0

- Dos 2880 eventos de rompimento, 2880 eventos de FAI, 3360 eventos de conexão e 3360 eventos de desconexão, a configuração 4 detectou 1755 eventos de rompimento, 1975 eventos de FAI, 2760 eventos de conexão e 2875 eventos de desconexão.
- Dos 1755 eventos de rompimento detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.
- Dos 1975 eventos de FAI detectados, 99,8% tiveram pelo menos uma saída do classificador como FAI, 91,9% tiveram duas saídas do classificador como FAI e 70,3% tiveram as três saídas do classificador como FAI.
- Dos 2760 eventos de conexão detectados, 0,005% tiveram pelo menos uma saída do classificador como FAI.
- Dos 2875 eventos de conexão detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.

6.1.5 Desempenho da configuração 5

A Figura 6.8 mostra o diagrama da configuração 5.

Figura 6.8 – Diagrama da configuração 5.

Na configuração 5, a entrada é a corrente *In* a qual passa pelo detector de eventos para determinar as possíveis posições onde se tem eventos. Depois é realizado o cálculo dos indicadores da corrente *In*. No final, é utilizada a RNA para classificar cada um dos eventos

detectados. Na Tabela 6.6 são apresentados os resultados da implementação da configuração 5.

Tabela 6.6 – Resultados da configuração 5.

CLASSES	ROMPIMENTO 1755	FAI 1975	CONEXÃO 2760	DESCONEXÃO 2875
2	0	1920	60	2
1	1755	27	2693	2856
0	0	28	7	17

- Dos 2880 eventos de rompimento, 2880 eventos de FAI, 3360 eventos de conexão e 3360 eventos de desconexão, a configuração 5 detectou 1755 eventos de rompimento, 1975 eventos de FAI, 2760 eventos de conexão e 2875 eventos de desconexão.
- Dos 1755 eventos de rompimento detectados, nenhum deles foi classificado como FAI.
- Dos 1975 eventos de FAI detectados, 97,2% foram classificados como FAI.
- Dos 2760 eventos de conexão detectados, 0,02% foram classificados como FAI.
- Dos 2875 eventos de conexão detectados, 0,0007% foram classificados como FAI.

6.1.6 Conclusões sobre o desempenho das configurações da metodologia 1

As percentagens de detecção de eventos de cada uma das configurações são apresentadas na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Percentagens de detecção das configurações da metodologia 1.

	ROMPIMENTO	FAI	CONEXÃO	DESCONEXÃO
CONFIGURAÇÃO 1	67,6%	69,1%	99,1%	100,0%
CONFIGURAÇÃO 2	67,6%	69,1%	99,1%	100,0%
CONFIGURAÇÃO 3	60,9%	68,6%	82,1%	85,6%
CONFIGURAÇÃO 4	60,9%	68,6%	82,1%	85,6%
CONFIGURAÇÃO 5	60,9%	68,6%	82,1%	85,6%

A diferença entre a quantidade de eventos simulados e a quantidade de eventos detectados se deve aos seguintes aspectos:

- Rompimentos de condutor com pouca carga a jusante do ponto de rompimento, o que gera uma variação muito pequena nas correntes medidas em subestação, característica

que impossibilita sua correta detecção. Neste aspecto, as configurações que utilizaram as correntes de fase *Ia*, *Ib*, *Ic*, como entradas do bloco de detecção (configurações 1 e 2) apresentaram melhores porcentagens de detecção do que as configurações que utilizaram a corrente de *In* como entrada do bloco de detecção (configurações 3, 4 e 5).

- FAI do lado carga com pouca carga à jusante da barra em falta tem correntes muito baixas ou quase nulas, o que impossibilita sua correta detecção. Esta característica foi observada em algumas das simulações de FAI feitas nos ramais do tronco principal do circuito A. Neste aspecto as 5 configurações apresentaram porcentagens similares de detecção.
- Conexão e desconexão de cargas com pouca potência geram poucas variações nas correntes medidas em subestação o que dificulta sua correta detecção. Neste aspecto, as configurações que utilizaram as correntes de fase *Ia*, *Ib*, *Ic*, como entradas do bloco de detecção (configurações 1 e 2) apresentaram melhores porcentagens de detecção do que as configurações que utilizaram a corrente de *In* como entrada do bloco de detecção (configurações 3, 4 e 5).

A Tabela 6.8 agrupa os resultados (em porcentagens) obtidos na implementação das 5 configurações.

Tabela 6.8 – Resultados das configurações em porcentagens.

	CLASSES	CONFIGURAÇÃO 1	CONFIGURAÇÃO 2	CONFIGURAÇÃO 3	CONFIGURAÇÃO 4	CONFIGURAÇÃO 5
ROMPIMENTO	2	--	--	--	--	0%
	2 ~ ~	0%	0%	0%	0%	--
	2 2 ~	0%	0%	0%	0%	--
	2 2 2	0%	0%	0%	0%	--
	2 NaN NaN	0%	0%	0%	0%	--
	1	--	--	--	--	100,0%
	1 1 ~	70,2%	70,2%	100,0%	100,0%	--
	1 1 1	58,8%	58,8%	100,0%	96,0%	--
	1 NaN NaN	29,8%	29,8%	0%	0%	--
	0	--	--	--	--	0,0%
	0 0 ~	0%	0%	0%	0%	--
	0 0 0	0%	0%	0%	0%	--
	0 NaN NaN	0%	0%	0%	0%	--
FAI	2	--	--	--	--	97,2%
	2 ~ ~	99,7%	86,5%	100,0%	99,9%	--
	2 2 ~	47,8%	41,6%	99,9%	96,5%	--
	2 2 2	28,8%	23,1%	99,3%	82,1%	--
	2 NaN NaN	51,2%	39,2%	0%	0%	--
	1	--	--	--	--	1,4%
	1 1 ~	0,0%	0%	0%	0,15%	--
	1 1 1	0%	0%	0%	0%	--
	1 NaN NaN	0,1%	0,5%	0%	0%	--
	0	--	--	--	--	1,4%
	0 0 ~	0,0%	2,2%	0,1%	2,8%	--
	0 0 0	0%	0%	0%	0%	--
	0 NaN NaN	0,2%	11,9%	0%	0%	--
CONEXÃO	2	--	--	--	--	2,2%
	2 ~ ~	0,03%	0,03%	0%	3,4%	--
	2 2 ~	0%	0%	0%	0,3%	--
	2 2 2	0%	0%	0%	0%	--
	2 NaN NaN	0%	0%	0%	0%	--
	1	--	--	--	--	97,6%
	1 1 ~	90,5%	88,1%	100,0%	98,0%	--
	1 1 1	71,9%	60,2%	100,0%	84,4%	--
	1 NaN NaN	9,5%	9,5%	0%	0%	--
	0	--	--	--	--	0,3%
	0 0 ~	0%	2,3%	0%	1,6%	--
	0 0 0	0%	0%	0%	0%	--
	0 NaN NaN	0%	0%	0%	0%	--
DESCONEXÃO	2	--	--	--	--	0,1%
	2 ~ ~	0%	0%	0%	0%	--
	2 2 ~	0%	0%	0%	0%	--
	2 2 2	0%	0%	0%	0%	--
	2 NaN NaN	0%	0%	0%	0%	--
	1	--	--	--	--	99,3%
	1 1 ~	97,4%	97,5%	100,0%	100,0%	--
	1 1 1	77,6%	77,7%	99,9%	99,6%	--
	1 NaN NaN	2,5%	2,5%	0%	0%	--
	0	--	--	--	--	0,6%
	0 0 ~	0,1%	0%	0%	0%	--
	0 0 0	0%	0%	0%	0%	--
	0 NaN NaN	0%	0%	0%	0%	--

Da Tabela 6.8 foram obtidas as seguintes conclusões:

1. Nenhuma das 5 configurações teve uma classificação de eventos de rompimento como evento de FAI.
2. A configuração 3 obteve a maior percentagem de eventos de FAI dentro da classe 2 ~ ~, seguido pela configuração 4, configuração 1, configuração 5 e configuração 2.
3. A configuração 3 e a configuração 4 obtiveram o maior percentagem de eventos de FAI dentro da classe 2 2 ~ e a classe 2 2 2.
4. Segundo o exposto em 2 e 3, a classificação de evento de FAI utilizando como entrada a corrente de fase I_n apresenta melhor desempenho do que a utilização como entrada das correntes de fase I_a , I_b , I_c .
5. A configuração 3 obteve o maior percentagem de eventos de FAI classificados fora da classe 2.
6. A configuração 3 foi a única configuração que não obteve nenhuma classificação de eventos de conexão/desconexão dentro de alguma das classes que tem a ver com FAI.
7. Segundo o exposto em 1 e 6, a melhor classificação dos eventos de rompimento, conexão e desconexão como não eventos de FAI, se obtém utilizando como entrada a corrente I_n .
8. Os eventos de FAI foram os eventos que apresentaram os maiores percentagens de classificação errônea, seguido pelos eventos de conexão e os eventos de desconexão.
9. Comparando a configuração 3 com a configuração 4 é possível concluir que a adição do cálculo dos indicadores da corrente I_n , como entradas da RNA, melhora a assertividade da classificação da RNA.
10. A detecção baseada na corrente I_n e no cálculo dos indicadores da corrente I_n (configuração 5), não consegue ter os mesmos desempenhos do que as configurações 3 e 4, as quais utilizam como entrada a corrente I_n e o cálculo dos indicadores das corrente de fase I_a , I_b , I_c e o cálculo dos indicadores das sequências I_0 , I_1 , I_2 .

6.2 Desempenho da metodologia 2

A metodologia 2 foi avaliada utilizando os mesmos sinais com os quais foi testado o desempenho da metodologia 1. Segundo 5.2.3, os indicadores $\Delta\xi(k)$ e $\Delta\xi_{cc}(k)$ adotam valores positivos para eventos de FAI. Baseado no valor destes dois indicadores foram estabelecidas 6 classes para os eventos de conexão monofásica detectados pela metodologia 2. A seguir serão descritas as 6 classes estabelecidas:

- Classe 1: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) > 0$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) > 0$.
- Classe 2: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) > 0$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) < 0$.
- Classe 3: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) < 0$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) > 0$.
- Classe 4: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) < 0$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) > 0$.
- Classe 5: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) > 0$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) = 0$.
- Classe 6: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) = 0$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) = 0$.

Os eventos que estiverem dentro da classe 1 são os eventos que maior probabilidade tem de serem FAI. A percentagem de detecção de eventos da metodologia 2 é apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Percentagens de detecção da metodologia 2.

	ROMPIMENTO	FAI	CONEXÃO	DESCONEXÃO
DETECÇÃO	26,1%	22,6%	80,7%	80,4%

A diferença entre a quantidade de eventos simulados e a quantidade de eventos detectados se deve aos seguintes aspectos:

- Eventos de rompimento de condutor, FAI, conexão e de desconexão de carga que não geraram a suficiente energia ($\xi_j(k)$) para ultrapassar o limiar estabelecido.
- Eventos que ultrapassaram o limiar estabelecido para $\xi_j(k)$ pero que tiveram um $\Delta I < THDinf_DI$ ou um $\Delta I > THDsup_DI$.

A Tabela 6.10 apresenta a quantidade de eventos de rompimento de condutor, eventos de FAI, eventos de conexão de carga e eventos de desconexão de carga que caíram dentro da Classe 1, 2, 3, 4, 5 ou 6.

Tabela 6.10 – Quantidade de eventos por classe.

CLASSE	ROMPIMENTO 752	FAI 652	CONEXÃO 2713	DESCONEXÃO 2702
1	0	652	610	0
2	0	0	60	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

Segundo o apresentado na Tabela 6.10 é possível escrever as seguintes conclusões:

- Nenhum dos eventos de rompimento detectados se encontra na classe 1, o que indica que não se obteve classificação errônea de eventos de desconexão monofásica.
- Todos os eventos de FAI se encontram dentro da classe que agrupa os eventos com maior probabilidade de ser FAI.
- Dos 2713 eventos de desconexão de carga que foram detectados, 24,6% foram classificados como eventos de conexão monofásica.
- Nenhum dos eventos de desconexão de carga detectados se encontra na classe 1, o que indica que não se obteve classificação errônea de eventos de desconexão monofásica.
- 91,0% dos eventos de conexão de carga que foram classificados como conexão monofásica se encontram dentro da classe que agrupa os eventos com maior probabilidade de ser FAI. Segundo estes resultados, não é suficiente com que os indicadores sejam maiores que zero para classificar os eventos como FAI. Para solucionar este problema, foi estabelecido um limiar igual a 0,0267 para o indicador $\Delta\xi_{cc}(k)$. Aplicando o limiar estabelecido não foram obtidos eventos de conexão de carga dentro da classe 1.

6.3 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados da implementação de 5 configurações da metodologia 1 e os resultados da implementação da metodologia 2 de detecção proposta utilizando um banco de dados criado com o ATP. Os resultados apresentados evidenciaram a dificuldade existente na detecção de todos os eventos de FAI. Os eventos de FAI do lado da carga foram aqueles que apresentaram maiores dificuldades de detecção, fato que se poderia esperar também em FAI reais.

Segundo o apresentado neste capítulo, as FAI além de afetarem a fase em falta, para o caso de FAI do lado do gerador, afetam também as outras duas fases, e portanto, o evento de FAI foi detectado em mais de uma fase. Para alguns dos casos de FAI do lado da carga, as fases que não estiveram em falta perceberam o evento e, por conseguinte tiveram uma detecção positiva de FAI.

As configurações da metodologia 1 que utilizaram a corrente *In* como parâmetro de entrada, assim como o cálculo dos indicadores das correntes de fase e o cálculo dos indicadores das sequências, apresentaram os melhores desempenhos na classificação dos eventos de FAI. É de ressaltar também, que todas as configurações testadas apresentaram percentagens de detecção de FAI superiores aos 80%, tendo melhor desempenho a configuração 3, seguido da configuração 4, configuração 2, configuração 1 e configuração 5.

A classificação dos eventos de FAI é baseada em indicadores, os quais foram estabelecidos a partir das características presentes nas FAI que foram simuladas utilizando o ATP. A correta classificação dos eventos de FAI reais terá mais sucesso na medida em que os indicadores dos eventos analisados apresentem comportamentos semelhantes aos comportamentos observados nas FAI simuladas. No caso de se detectarem eventos, os quais são de FAI, cujo comportamento não é o padrão, a classificação das metodologias poderia ter como saída uma classificação errada do evento.

O estabelecimento dos indicadores maiores que zero para detecção positiva de eventos de FAI, como foi observado na Tabela 6.10, não constitui um critério que possa ser usado para classificar os eventos que acontecem num SD. Limiares devem ser estabelecidos com o propósito de descartar aqueles eventos que possam ser incluídos na classe 1 da metodologia 2 e que não constituem eventos de FAI. Numa eventual aplicação real da metodologia 2, a escolha certa dos limiares dependerá da quantidade de eventos de FAI com os quais forem calibrados este limiares.

7 Análise de ocorrências de cabo rompido na subestação em estudo

Cada ocorrência no SD apresenta diversas características que ajudam na sua descrição e classificação. Para a subestação em estudo, a concessionária disponibilizou o relatório de ocorrências dos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio, Junho e Julho de 2014. Os relatórios são feitos em base a um *template* de 14 campos nos quais são descritas a maioria das características da ocorrência. A Tabela 7.1 apresenta os campos com os quais são caracterizadas ocorrências.

Tabela 7.1 – Campos do relatório de ocorrências.

• DATA_HORA_REAL_INICIO	• NUM_PTE
• COD_NATUREZA_PEDIDO	• COD_CLASSE
• COD_CAUSA	• COD_SERVICO
• COD_COMPONENTE	• COD_ESTADO_COMPONENTE
• IND_FASE_A_D	• IND_FASE_B_E
• IND_FASE_C_F	• IND_FASE_N
• NOM_CIRCUITO	• DSC_OBSERVACAO_FINALIZACAO

Fonte: Adaptado de (Relatório de ocorrências da subestação em estudo).

A seguir apresenta-se a descrição de cada um dos campos da Tabela 7.1:

- DATA_HORA_REAL_INICIO: Data e hora em que foi reportada a ocorrência.
- NUM_PTE: Código que é associada à ocorrência.
- COD_NATUREZA_PEDIDO: Código da natureza da ocorrência que foi reportada. O código é designado segundo a tabela de naturezas própria da concessionária.
- COD_CLASSE: Código da classe de ocorrência que foi reportada. O código é designado segundo a tabela de classes própria da concessionária.
- COD_CAUSA: Código da causa que deu origem à ocorrência. O código é designado segundo a tabela de causas própria da concessionária.

- COD_SERVICO: Código do serviço que deve ser feito para solucionar a ocorrência. O código é designado segundo tabela de serviços própria da concessionária.
- COD_COMPONENTE: Código do componente que foi afetado na ocorrência. O código é designado segundo a tabela de componentes própria da concessionária.
- COD_ESTADO_COMPONENTE: Código do estado do componente que foi afetado na ocorrência. O código é designado segundo a tabela de estado de componentes próprio da concessionária.
- IND_FASE_A_D: Se a fase A foi afetada na ocorrência o valor deste campo é imposto em “1”, caso contrario em “0”.
- IND_FASE_B_E: Se a fase B foi afetada na ocorrência o valor deste campo é imposto em “1”, caso contrario em “0”.
- IND_FASE_C_F: Se a fase C foi afetada na ocorrência o valor deste campo é imposto em “1”, caso contrario em “0”.
- IND_FASE_N: Se a fase N foi afetada na ocorrência o valor deste campo é imposto em “1”, caso contrario em “0”.
- NOM_CIRCUITO: Nome do circuito em que se deu a ocorrência.
- DSC_OBSERVACAO_FINALIZACAO: Descrição adicional da ocorrência.

O campo DATA_HORA_REAL_INICIO, embora não tenha a hora exata do acontecimento da ocorrência, ajuda a ter uma estimativa da data e hora em que se deu a ocorrência.

Com o propósito de obter só aqueles eventos que tem como origem “FIO PARTIDO OU PRÓXIMO NO SOLO” e origem “FIO PARTIDO”, foi feita uma primeira filtragem dos dados. Uma vez aplicada esta primeira filtragem, foi percebido que ainda existiam eventos que não cabem dentro do conjunto de ocorrências que poderiam causar um evento de FAI no primário do alimentador. Ocorrências com classificações tais como, “SERVICOS NA REDE SECUNDARIA”, “SERVICO NO RAMAL DE LIGACAO” e “DESLIG.PRIM – DEFTO.REDE SEC” são ocorrências onde não se teria um rompimento de condutor primário, já que são ocorrências no secundário do circuito. Uma pesquisa com mais detalhe utilizando as descrições que se encontram no campo “DSC_OBSERVACAO_FINALIZACAO” revelou que algumas das ocorrências referidas ao secundário tiveram descrições de ocorrências com rompimento do cabo primário. Mesmo assim elas não terem uma classificação no campo COD_CLASSE.

A Tabela 7.2 apresenta o número de ocorrências de cabo rompido por tipo de causa no período analisado.

Tabela 7.2 – Número de ocorrências por tipo de causa na subestação em estudo.

CHUVA	5
VENTO FORTE	7
LIGAÇÕES CLANDESTINAS	1
QUEDA OU CRESCIMENTO DE ÁRVORE	41
QUEDA DE ARVORES	17
TERCEIROS	8
DEFEITO OCAS. OUTRA CONCES.	1
SOBRECARGA	5
APLICAÇÃO INCORRETA A EQUIP.	4
DETERIORAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	14
FALHA DE MATERIAIS	5
CAUSAS NÃO DETERMINADAS	10

Fonte: Dados de (Relatório de ocorrências da subestação em estudo).

Segundo apresentado na Tabela 7.2, as causas relacionadas com árvores são as que mais geraram ocorrências de cabo rompido no período de tempo analisado (Janeiro, Fevereiro, Marco, Abril, Maio, Junho e Julho). Neste trabalho só serão analisadas as ocorrências e oscilografias do circuito A.

Aplicando o filtro relatado acima, foram obtidas para o circuito A um conjunto de 11 ocorrências que resultaram em cabo rompido. Na Tabela 7.3 são apresentadas as ocorrências de cabo rompido no circuito A. Para melhorar o entendimento do relatório de ocorrências da concessionária, os campos que contém códigos (COD_NATUREZA_PEDIDO, COD_CLASSE, DSC_CAUSA, COD_SERVICO, COD_COMPONENTE, COD_ESTADO_COMPONENTE) foram substituídos pelos campos, DSC_NATUREZA_PEDIDO, DSC_CLASSE, DSC_CAUSA, DSC_SERVICO, DSC_COMPONENTE, DSC_ESTADO_COMPONENTE, os quais contém a descrição do código.

Tabela 7.3 – Ocorrências de cabo rompido no circuito A.

NUM_P TE	DATA_HORA_REAL _INICIO	DSC_NATUREZA_PE _DIDO	DSC_CLASSE	DSC_CAUSA	DSC_SERVICO	DSC_COMPONENTE	DSC_ESTADO_COMPONENTE	IND_FASE_A_D	IND_FASE_B_E	IND_FASE_C_F	IND_FASE_N	NOM_CIRCUITO	DSC_OBSERVACAO_FINALIZACAO
7178	02/01/2014 17:52	FIO DE PT A PT PARTIDO	SERVIÇO NO RAMAL LIGAÇÃO	FALHA DE MATERIAIS	SUBSTITUIR	CONEXAO T.CUNHA	SOLTO	1	0	0	0	COT 0111	
7726	12/01/2014 17:31	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO	DESLIGAMENTO NA REDE PRIMÁRIA	VENTO FORTE	REPARAR	CABOS (FIOS)	ROMPIDO, PARTIDO	1	0	0	0	COT 0111	CIRCUITO COM FALTA DE FASE DESDE ÀS 17:32 CONDUCTOR PARTIDO ENTRE OS POSTES S/Nº DA RUA SANTO AFONSO, PRÓXIMO DA ET-28734 O CIRCUITO FOI MANOBRADO PARCIALMENTE DEVIDO SOBRECARGA NOS CIRCUITOS VIS A VIS.
44184	14/01/2014 20:32	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO		ANOMALIA DE VOLTAGEM	VERIFICAR	CENTRO MEDICAO	OUTROS	1	0	0	0	COT 0111	FOI FEITO MEDICOES NA RESIDENCIA DO RECLAMANTE ESTA EM ONDEM RECLAMA FIOS DA TELEFONICA E TV ACABO BAMBO ENFRETE SUA GARAGEM O MESMO FOI ORIENTADO A CHAMAR A TELEFONICA
19931	21/01/2014 22:55	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO		TERCEIROS	RETIRAR	CABOS (FIOS)	OUTROS	0	0	0	0	COT 0111	ISOLADA REDE DE IP PARTIDA DEVIDO INCENDIO NO MATO.
8701	24/01/2014 10:53	FIO DE PT A PT PARTIDO	SERVIÇO NO RAMAL LIGAÇÃO	PAPAGAIO	SUBSTITUIR	PRE REUNIDO	ROMPIDO, PARTIDO	0	1	1	1	COT 0111	NÃO RECLAMA DANOS
12504	25/01/2014 08:03	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO	DESLIGAMENTO NA REDE PRIMÁRIA	FALHA DE MATERIAIS	SUBSTITUIR	ELO FUSIVEL	QUEIMADO	0	0	1	0	COT 0111	EQUIPE 072 LOCAL UMA FASE SOLTA DO 1º ENCOSTANDO NA CRUZETA DE AÇO FALTANDO UMA FASE EM FRENTE CASA MARIA MAIA NECESSARIO TURMA TMA
3601	23/03/2014 09:45	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO	DESLIG. PRIM. - DEFTO. REDE SEC.	DETERIORAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	SUBSTITUIR	CABOS (FIOS)	EM CURTO	1	0	0	0	COT 0111	
5394	19/03/2014 11:27	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO	DESLIG. PRIM. - DEFTO. REDE SEC.	QUEDA OU CRESCIMENTO DE ARVORE	REPARAR	CABOS (FIOS)	ROMPIDO, PARTIDO	1	1	0	1	COT 0111	EQUIPE PRECISOU AGUARDAR EQUIPAMENTOS PARA EFETUA REPAROS NO LOCAL -- CB76 M5567226 CLIENTE INFORMA FIO DE PT A PT PARTIDO, POR CAMINHÃO, NO CHÃO, SEM ENERGIA NO LOCAL. SEM MOTO NA REGIÃO NO MOMENTO. KM 24 RAPOSO GRANJA VIANA AV DONA CHERUBINA VIANA.
10664	21/03/2014 17:33	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO	DESLIGAMENTO NA REDE PRIMÁRIA	QUEDA OU CRESCIMENTO DE ARVORE	REPARAR	CABOS (FIOS)	ROMPIDO, PARTIDO	1	1	0	0	COT 0111	GALHOS SOBRE CONDUCTORES BEM COMO CONDUCTORES PARTIDOS ENTRE POSTES S/Nº DA RUA SANTO AFONSO, PRÓXIMO A ET 28734. NÃO FOI POSSÍVEL MANOBRAR COT-111 DEVIDO A CARGA DOS CIRCUITOS ADJACENTES. CIRCUITO PERRMANECEU COM FALTA DAS FASES D E E DAS 17:46 ÀS 18:42.
24667	21/03/2014 22:46	FIO PRIMARIO PARTIDO	SERVIÇOS NA REDE SECUNDÁRIA	QUEDA OU CRESCIMENTO DE ARVORE	REPARAR	CABOS (FIOS)	ROMPIDO, PARTIDO	0	1	0	0	COT 0111	ok
7600	26/05/2014 10:32	FIO PARTIDO PRÓXIMO OU NO SOLO	SERVIÇO NO RAMAL LIGAÇÃO	TERCEIROS	SUBSTITUIR	TRIPLEX	ROMPIDO, PARTIDO	1	1	0	0	COT 0111	((INC_ID=20672; REF_LBL=19729-1):

Fonte: Adaptado de (Relatório de ocorrências da subestação em estudo).

Das 11 ocorrências de cabo rompido apresentadas na Tabela 7.3, 2 ocorrências não tem uma descrição do evento no campo DSC_OBSERVACAO_FINALIZACAO, 3 apresentaram na descrição da classe do evento DESLIGAMENTO NA REDE PRIMÁRIA, ficando assim 9 ocorrências referidas a eventos acontecidos no secundário do circuito. Informações descritas no campo DSC_OBSERVACAO_FINALIZACAO, tais como o local do acontecimento do evento, são elementos de grande ajuda no desenho de metodologias de localização de eventos, informação que junto com as oscilografias medidas em subestação, constituem uma base de dados com a qual poderiam ser avaliadas diversas metodologias de localização de faltas propostas na literatura.

7.1 Cruzamento de informações do circuito A

Em conjunto com o relatório de ocorrências reportadas na subestação em estudo, também foram disponibilizadas pela concessionária as informações de atuação dos equipamentos instalados na subestação. Estas duas informações foram cruzadas com o propósito de conhecer quais foram as ocorrências que provocaram uma atuação dos equipamentos. Na Tabela 7.4 são apresentadas as informações de atuação dos equipamentos no instante de tempo em que foram reportadas a ocorrências de cabo rompido.

Tabela 7.4 – Cruzamento das ocorrências de cabo rompido no circuito A como o relatório de atuação dos elementos instalados na subestação A.

Ocorrência		Historico de atuações na subestação			
NUM_PTE	DATA_HORA_REAL_INICIO	Data e Hora	Equipamento	Descritivo do Evento	Estampa de Tempo
7178	12/01/2014 17:31	12/01/2014 17:32	IV	COMUNICACAO QUAL NORMAL	12/1/2014 17:32:46.000
		12/01/2014 17:32	AL	ALARME CONTINUO ALAR ALARME	12/1/2014 18:40:26.818
		12/01/2014 17:32	DJ	DJ21 B3 13.8 EST ABERTO	12/1/2014 18:40:27.075
		12/01/2014 17:32	AL	ALARME CONTINUO ALAR NORMAL	12/1/2014 18:40:27.643
		12/01/2014 17:32	DJ	DJ21 B3 13.8 EST FECHADO	12/1/2014 18:40:28.200
44184	14/01/2014 20:32	14/01/2014 20:19	AL	ALARME CONTINUO ALAR ALARME	14/1/2014 21:27:18.169
		14/01/2014 20:19	DJ	DJ21 B3 13.8 EST ABERTO	14/1/2014 21:27:18.375
		14/01/2014 20:19	AL	ALARME CONTINUO ALAR NORMAL	14/1/2014 21:27:18.729
		14/01/2014 20:19	DJ	DJ21 B3 13.8 EST FECHADO	14/1/2014 21:27:19.471
		14/01/2014 20:19	AL	ALARME CONTINUO ALAR ALARME	14/1/2014 21:27:20.970
		14/01/2014 20:19	DJ	DJ21 B3 13.8 EST ABERTO	14/1/2014 21:27:21.096
		14/01/2014 20:19	AL	ALARME CONTINUO ALAR NORMAL	14/1/2014 21:27:21.687
		14/01/2014 20:19	DJ	DJ21 B3 13.8 EST FECHADO	14/1/2014 21:27:45.210

Fonte: Adaptado de (Relatório de eventos na subestação em estudo).

Segundo o apresentado na Tabela 7.4 só duas ocorrências de cabo rompido provocaram uma atuação do elemento DJ21 do circuito A.

Na Tabela 7.5 é apresentado o cruzamento dos eventos de cabo rompido do circuito A com o intervalo de tempo de medições de oscilografias disponíveis do circuito A.

Tabela 7.5 – Cruzamento das ocorrências de cabo rompido no circuito A com as medições de oscilografia disponíveis do circuito A.

	2014						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho
Oscilografia	30-12-2013 20-03-2014						
Relatório de ocorrências	01-01-2014 30-07-2014						
Correlação de eventos	02	12	14	21	24	25	
				19	21	21	23
							26

O cruzamento de informações apresentado na Tabela 7.5 indica que das ocorrências de cabo rompido reportadas para o circuito A, o intervalo de tempo de oscilografia disponível só consegue abarcar 7 das 11 ocorrências. Isto limita a 7 o número de ocorrências de cabo rompido para os quais se dispõe de oscilografia.

7.2 Análise de medições oscilográficas das ocorrências de cabo rompido do circuito A

Para cada uma das ocorrências de cabo rompido que caem dentro do intervalo de medições oscilográficas, foi feita uma análise da forma de onda das tensões e correntes, com o propósito de identificar qualquer sinal de variação que pudesse indicar o acontecimento de uma FAI. As ocorrências serão referidas pelo número no campo NUM_PTE.

Para o caso das ocorrências 7726 e 44184, as quais, segundo a Tabela 7.4, provocaram uma atuação dos elementos instalados em subestação, foi fácil identificar na forma de onda a interrupção de corrente causada pela atuação do elemento DJ21.

Na Figura 7.1 é apresentada uma parte da oscilografia do evento 7726. No gráfico b) da Figura 9-1 se observa que o evento começou como um evento de curto circuito bifásico com duração aproximada de 220ms, para depois converter-se em um evento de curto circuito trifásico. Uma vez que as fases em falta permaneceram por alguns ciclos com valores RMS próximo 4,0kA, o elemento DJ21 instalado na subestação atua desligando o circuito. Depois de aproximadamente 1s, o elemento DJ21 religa o circuito, como se observa no gráfico c) da Figura 7.1. No gráfico c) se observa que no momento da conexão do circuito, só duas fases

voltaram a níveis de corrente perto dos níveis que apresentam antes do acontecimento da ocorrência. A fase A teve um comportamento transitório durante alguns ciclos e não mais recuperou seu nível anterior de corrente. A fase A foi a fase que não retornou ao seu nível anterior de corrente, que corresponde à fase que foi reportada com defeito na Tabela 7.3. A oscilação transitória que apresenta a fase A durante 200ms pode ser devido ao contato do cabo rompido com alguma superfície, o que indicaria um possível evento de FAI. Na Figura 7.2 se apresenta a oscilação transitória observada na fase A.

Figura 7.1 – Oscilografia da ocorrência 7726.

Fonte: Obtido e adaptado de (Investigator®).

Figura 7.2 – Oscilação transitória observada na fase A no evento 7726.

Fonte: Obtido com (Investigator®).

A forma de onda apresentada na Figura 7.2 se diferencia muito das formas de onda de FAI apresentadas no capítulo 2. Características de deformação no cruzamento por zero e de comportamento crescente até um nível quase estável estão ausentes nesta forma de onda. Outro detalhe que se observa na Figura 7.2 é a variação da frequência fundamental do sinal durante 60ms (frequência fundamental aproximadamente igual a 120Hz), característica que até o momento não tem sido relatada para eventos de FAI.

A ocorrência 44184 também apresenta uma atuação do equipamento DJ21 e eventos de curto bifásico e trifásico, similar ao que aconteceu na ocorrência 7726. Segundo o gráfico a) da Figura 7.3, a ocorrência 44184 pode ser separada em duas janelas de tempo. A primeira janela (apresentada no gráfico b) mostra a ocorrência de um evento trifásico com posterior desligamento do circuito e com uma reconexão 200ms depois de acontecer o desligamento. Na segunda janela (apresentada no gráfico c), se apresenta a sequência de eventos, curto monofásico seguido de um curto trifásico, desconexão do circuito, reconexão do circuito 1s depois da anterior desconexão, de novo um curto monofásico 1,5s depois da reconexão, seguido de um curto trifásico e a consequente desconexão. Depois desta última desconexão, é feita uma conexão do circuito 25 segundos depois da última desconexão. A partir deste ponto o sistema regressa a seu nível anterior de corrente. Segundo as informações apresentadas na Tabela 7.3, a ocorrência tem uma natureza de “FIO PARTIDO OU PRÓXIMO DO SOLO” mas não teve uma descrição de componentes partidos ou rompidos. O evento 44184 não constitui um evento de FAI com rompimento de condutor primário.

Figura 7.3 – Oscilografia da ocorrência 44184.

Fonte: Obtido e adaptado de (Investigator®).

Para as ocorrências que não provocaram atuação do equipamento DJ21 (ocorrências 7178, 19931, 8701, 12504, 5394), não foi possível observar variações na forma de onda que pudessem indicar o instante da ocorrência. Ocorrências referidas ao secundário (ocorrências 7178, 8701), constituem eventos em que a redução de carga provocada pelo rompimento do condutor é insignificante em comparação com as magnitudes de correntes medidas na subestação. Para as ocorrências 19981, 12504 e 5394, embora tenham provocado desligamentos na rede primária, também foi obtida resposta negativa para identificação do evento.

Para as ocorrências que de forma visual não foi possível obter uma identificação positiva do instante de acontecimento do evento, serão utilizadas as metodologias de detecção propostas no capítulo 5, com o propósito de procurar de forma mais profunda um sinal que possa ser

associado às ocorrências. Os resultados da implementação das metodologias serão expostos no capítulo 8.

7.3 Possível evento de FAI

Analisando as oscilografias em procura de sinais que indicaram o acontecimento da ocorrência 12504, foi identificado um evento monofásico, com intermitências, variações de magnitude e comportamentos crescentes observados nas FAI relatadas no capítulo 2. O evento que não foi detectado pelo equipamento DJ21 nem pelo medidor G4430, constitui o evento com maior semelhança em forma de onda e comportamento com um evento de FAI. Na Figura 7.4 é apresentada a oscilografia do evento.

O evento não se encontra dentro do relatório de ocorrências de cabo rompido, pelo qual pode-se concluir que não se deveu a um evento de rompimento de condutor. No gráfico b) da Figura 7.4, as setas em verde indicam as crestas de dois ciclos que apresentam assimetria entre o semiciclo positivo e o semiciclo negativo, característica observada em sinais reais de FAI (Masa, 2013). No gráfico c) da Figura 7.4, as setas em verde indicam aleatoriedades em magnitude que apresenta a forma de onda da corrente, característica também relatada em diversos trabalhos (MASA, 2013; RUSSELL et al., 1989).

A origem da causa do evento é desconhecida. Contato de galho de árvore com a fase afetada ou qualquer outro tipo de contato podem ser consideradas hipóteses do que poderia ter ocasionado o evento. Sem ter uma razão justificada da causa do evento, não é possível assegurar com total certeza de que o evento seja uma FAI, mas o evento, pelas características de comportamento apresentadas, para este trabalho constitui o melhor exemplo do que poderia ser uma FAI.

Figura 7.4 – Evento no circuito A com comportamento semelhante à FAI.

Fonte: Obtido de (Investigator®).

7.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi analisado o relatório de ocorrências da subestação em estudo, o relatório de atuações dos equipamentos instalados na subestação, assim como analisadas as oscilografias dos instantes de acontecimento das ocorrências. O cruzamento destas informações permitiu identificar diversas ocorrências de cabo rompido que aconteceram no circuito A.

Das ocorrências de cabo partido analisadas (de forma visual) neste trabalho, nenhuma delas apresentou formas de onda que fossem semelhantes às formas de onda de FAI relatadas no capítulo 2. Tal fato não assegura a inexistência de uma ocorrência de rompimento de condutor com o consequente contato com alguma superfície, mas dá um claro exemplo das dificuldades que se tem para distinguir os eventos de FAI que acontecem em redes desequilibradas.

Um evento observado na análise das formas de onda do circuito apresentou características próprias das FAI. Este evento será considerado neste trabalho como um possível caso de FAI.

8 Aplicação prática das metodologias de detecção propostas

Neste capítulo serão descritos os resultados da implementação das duas metodologias de detecção de FAI propostas no capítulo 5, sobre eventos ocorridos no circuito A descrito anteriormente. As metodologias foram avaliadas utilizando o registro oscilográfico das ocorrências de cabo rompido analisadas no capítulo 7.

Com o propósito de determinar o instante do rompimento do cabo, foram analisadas janelas de uma hora para cada uma das ocorrências de cabo rompido em que não foi possível visualizar o instante de acontecimento da ocorrência (ocorrências 7178, 19931, 8701, 12504, 5394). Para as ocorrências 44184 e 7726 foram analisadas janelas de tempo de 10 minutos. O intervalo de oscilografia analisado para cada um das ocorrências é apresentado na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Intervalo de oscilografia analisado por ocorrência.

NUM_PTE	DATA_HORA_REAL_INICIO	INTERVALO DE TEMPO ANALISADO
7178	02/01/2014 17:52	02/01/2014 17:00:00 - 18:00:00
7726	12/01/2014 17:31	12/01/2014 17:45:00 - 17:55:00
44184	14/01/2014 20:32	14/01/2014 20:30:00 - 20:40:00
19931	21/01/2014 22:55	21/01/2014 22:00:00 - 23:00:00
8701	24/01/2014 10:53	24/01/2014 10:00:00 - 11:00:00
12504	25/01/2014 08:03	25/01/2014 07:30:00 - 08:30:00
5394	19/03/2014 11:27	19/03/2014 10:40:00 - 11:40:00

Fonte: Adaptado de (Relatório de ocorrências da subestação em estudo).

Neste trabalho as metodologias de detecção foram desenvolvidas em Matlab®, software utilizado para propósitos de pesquisa e avaliação do desempenho das metodologias de detecção. A implementação das metodologias em tempo real, requer linguagens de programação mais apropriadas para as tarefas de gestão rápida de dados e comunicação utilizando o protocolo XML. A solução de tais requerimentos não será desenvolvida já que se encontram fora do escopo deste trabalho.

8.1 Aplicação prática da metodologia 1

A metodologia 1 baseia-se na identificação do comportamento de *buildup* apresentado por alguns eventos reais de FAI. Este comportamento, segundo as simulações feitas em ATP, foi observado também em algumas das componentes harmônicas da fase em falta e em algumas componentes harmônicas da corrente de neutro (I_n). Para o caso das simulações feitas em ATP, a metodologia apresentou um bom desempenho na classificação dos eventos que foram detectados, embora para as ocorrências analisadas no capítulo 7 não se teve nenhuma indicativa de detecção de FAI, inclusive para a ocorrência com possibilidade de ser evento de FAI. Variação do número de ciclos para o cálculo dos indicadores (n) e variação da tolerância na classificação (q), foram feitas com o propósito de tentar identificar o possível caso de FAI, porém a metodologia não conseguiu identificar a FAI. Na Tabela 8.2 são apresentadas as variações de n e q testadas.

Tabela 8.2 – Variações de n e k testados para a metodologia 1.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Ciclos para o calculo dos indicadores (n)	3	3	4	4	2	2
Delta de tolerância na classificação (q)	0.8	0.5	0.8	0.5	0.8	0.8

A inexistência de uma FAI real limita a possibilidade de avaliar a assertividade da escolha dos indicadores desenhados para esta metodologia e portanto limita o sucesso da aplicação da metodologia.

Não todas as FAI apresentam a característica de *buildup*. A natureza aleatória do comportamento físico de ignição e extinção do arco faz com que não seja possível que todas as FAI apresentem o mesmo comportamento no começo da FAI. Assim, as metodologias que baseiam sua identificação no *buildup* só conseguem cobrir uma parte do universo das FAI, pelo qual não é possível ter uma certeza plena da saída deste tipo de metodologias.

8.2 Aplicação prática da metodologia 2

A implementação da metodologia 2 com sinais reais teve dificuldades devido à alta quantidade de eventos que caíram dentro da classe 1, a qual corresponde à classe dos eventos

de FAI. Limiares para os indicadores tiveram que ser estabelecidos. Neste trabalho o estabelecimento dos limiares foi baseado no comportamento apresentado pelo possível evento de FAI descrito em 7.3.

O resultado da aplicação da metodologia 2 no possível evento de FAI é apresentado na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Resultado da aplicação no possível evento de FAI.

	Fase Ia						Fase Ib						Fase Ic					
Ocorrência	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Possível FAI	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	3	0

Segundo a Tabela 8.3, a classe 4 contém 1 evento, a classe 5 contém 7 eventos e a classe 1 contém 3 eventos. Tal resultado indicaria a ocorrência de 3 eventos de FAI, um deles sendo detectado em I_b e os outros dois sendo detectados em I_c . Segundo o observado na forma de onda do possível evento de FAI (Figura 6.4), o evento aconteceu na fase c, mesma fase em que a metodologia detectou dois eventos de FAI. O valor dos indicadores dos eventos contidos na classe 1 é:

Fase Ib						Fase Ic					
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	3	0

$$\Delta\xi(k) = 48,37$$

$$\Delta\xi_{cc}(k) = 0,05$$

$$\Delta\xi(k) = 3,1 * 10^3$$

$$\Delta\xi_{cc}(k) = 364,3$$

$$\Delta\xi(k) = 3,7 * 10^3$$

$$\Delta\xi_{cc}(k) = 66,9$$

$$\underbrace{\hspace{15em}}$$

Indicadores do possível evento de FAI

A Figura 8.1 mostra o gráfico do cálculo das energias $\xi(k)$ da I_n do possível evento de FAI e o instante de acontecimento dos eventos que indicaram possível FAI

109

Figura 8.1 – a) Gráfico da energia $\xi(k)$ e o instante de acontecimento do evento 2 e 3, b) gráfico da

Na Figura 8.1, $E(k)$ representa a energia $\xi(k)$ e $TH_E(k)$ representa o limiar $(1 + \eta) * \max\{\xi_{past}\}$.

Observa-se que o valor do indicador $\Delta\xi(k)$ e do indicador $\Delta\xi_{cc}(k)$ dos eventos detectados na fase C é maior do que o valor calculado para o evento detectado na fase B. Tomando como base os valores dos indicadores do segundo evento foram estabelecidos dois limiares para os indicadores. A seguir são apresentados os novos critérios de classificação, os quais incluem os limiares estabelecidos:

- Classe 1: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) > C1 * 3,1 * 10^3$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) > C2 * 364,3$.
- Classe 2: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) > C1 * 3,1 * 10^3$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) < C2 * 364,3$.
- Classe 3: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) < C1 * 3,1 * 10^3$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) > C2 * 364,3$.
- Classe 4: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) < C1 * 3,1 * 10^3$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) > C2 * 364,3$.
- Classe 5: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) > C1 * 3,1 * 10^3$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) = 0$.

- Classe 6: O evento deve ser classificado como conexão monofásica com o indicador $\Delta\xi(k) = 0$ e o indicador $\Delta\xi_{cc}(k) = 0$.

Onde $C1$ e $C2$ são constantes de segurança da detecção. Com o propósito de detectar os eventos 2 e 3 foi estabelecido o valor da constante $C1 = 0,8$ e o valor da constante $C2 = 0,15$. Na realidade, o valor $3,1 * 10^3$ e o valor 364,3 deveriam ser quantidades estabelecidas a partir do estudo do comportamento dos indicadores de diversas FAI reais. Neste trabalho só se tem disponibilidade de um possível evento de FAI, pelo qual foram estabelecidas estas quantidades tomando em conta o estudo de um único caso.

Tendo-se estabelecidas as novas condições de classificação, a metodologia 2 foi aplicada nas ocorrências apresentadas na Tabela 8.1. Na Tabela 8.4 são apresentados os resultados da implementação da metodologia 2.

Tabela 8.4 – Resultados da implementação da metodologia 2 nas ocorrências de cabo rompido analisadas no capítulo 7.

	Fase Ia						Fase Ib						Fase Ic					
Ocorrência	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
7178	-	-	1	6	-	-	-	-	8	20	-	-	-	-	2	13	-	-
7726	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44184	-	-	10	14	-	-	-	-	9	42	-	-	-	-	10	52	-	-
19931	-	-	3	2	-	-	-	-	2	4	-	-	-	-	2	3	-	-
8701	-	-	-	13	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	23	-	-
12504	-	-	4	15	-	-	-	-	4	29	-	-	-	-	2	18	-	-
5394	-	-	-	1	-	-	-	-	1	7	-	-	-	-	2	9	-	-

Segundo o apresentado na Tabela 8.4, nenhuma das ocorrências de cabo rompido analisadas apresentou eventos dentro da classe 1, o que indicaria, segundo os critérios estabelecidos, que nenhum dos rompimentos que foram reportados nas ocorrências estudadas incluiu uma FAI.

A lógica da sequência do evento de FAI (rompimento de condutor - evento de desconexão monofásica, contato do condutor com a superfície - evento de conexão monofásica) não foi possível de ser aplicada já que não foi detectada nenhuma FAI nas ocorrências de cabo partido analisadas.

8.3 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados da implementação com sinais reais das metodologias de detecção propostas. Intervalos de oscilografia de uma hora para as ocorrências de cabo rompido foram considerados com o propósito de tentar achar o instante do rompimento do cabo.

Devido às diferenças do comportamento da FAI em simulações e o comportamento observado no possível caso de FAI, foi necessário ajustar as metodologias para se adaptarem a detecção do evento considerado como FAI.

A metodologia 1 não conseguiu identificar nenhuma FAI nos sinais das ocorrências de cabo rompido analisadas, mesmo tendo-se feito modificações nas variáveis n e k . Não todas as FAI apresentam o comportamento de *buildup*. A correta avaliação do desempenho da metodologia 1 precisa de uma maior quantidade de eventos reais de FAI.

Ajustes dos limiares da metodologia 2 foram estabelecidos utilizando as quantidades apresentadas pelos indicadores do possível evento de FAI. Utilizando tais indicadores, foi feita a implementação da metodologia 2 nas ocorrências de cabo partido analisadas no capítulo 7, obtendo-se um baixo índice de identificação de FAI.

O próximo capítulo apresenta as conclusões finais do trabalho e descreve as propostas de continuidade da pesquisa.

9 Conclusões

As FAI são fenômenos de difícil detecção em sistemas de distribuição multiaterrados. Os baixos níveis de corrente da FAI bem como os comportamentos aleatórios da forma de onda da fase em falta, constituem as principais dificuldades que enfrentam as metodologias de identificação de FAI.

As características das FAI foram apresentadas no capítulo 2 com o propósito de entender os princípios nos quais são baseadas as diversas metodologias que podem ser encontradas na literatura. Modelos que tentam reproduzir as FAI e a descrição de diversas metodologias de detecção também foram apresentados no capítulo 2.

Os resultados da implementação de três modelos de FAI presentes na literatura, apresentados no capítulo 3, evidenciam a inexistência de um modelo que consiga reproduzir todas as características das FAI, fato que parece ser ignorado por várias das metodologias de detecção propostas na literatura. Cada metodologia que se propõe detectar as características observadas em um único modelo de FAI abarca uma parte do universo das FAI. A identificação de todas as características associadas às ocorrências de FAI constitui o principal objetivo que devem perseguir as metodologias de detecção de FAI.

Neste trabalho foram propostas e avaliadas duas metodologias de identificação de FAI, as quais requerem que a forma de onda da FAI apresente as características para as quais foi focada a metodologia de identificação. A primeira metodologia foi focada na identificação da característica de *buildup* observada em algumas FAI reais. Esta metodologia é constituída por um bloco de detecção de eventos e um bloco de classificação de eventos. Todos os eventos selecionados pelo bloco de detecção são classificados por uma rede neural artificial treinada para detectar aqueles eventos que apresentem a característica de *buildup*. Os resultados da implementação com sinais gerados em ATP, apresentados em 6.1, mostraram que para os casos de FAI detectados, a metodologia 1 teve uma percentagem de detecção superior ao 80%. Casos de FAI do lado da carga e casos com impedância de falta, constituem o conjunto de casos que não foi possível detectar devido à pouca ou inexistente corrente consumida pela FAI, caso que pode ser esperado numa eventual aplicação prática da metodologia 1.

A segunda metodologia foi focada na identificação de incrementos de energia na faixa de frequências de 1920Hz a 3840Hz. Aqueles eventos cuja energia $\xi(k)$ ultrapassaram o limiar estabelecido e caíram dentro da classe 1, constituem os eventos com maiores possibilidades de ser FAI. Os resultados da implementação da metodologia apresentados em 6.2 mostraram que só foi possível identificar 22,6% dos casos de FAI. Os limiares estabelecidos para a corrente de carga foram responsáveis pela filtragem dos eventos para os quais não se garante uma classificação (eventos com $\Delta I < THD_{inf_DI}$) e para os eventos que não são considerados como FAI ($\Delta I > THD_{sup_DI}$). Os resultados também mostraram que todos os casos de FAI detectados pela metodologia foram classificados como FAI.

O estudo do funcionamento do medidor de qualidade de energia (MQE) G4430 apresentado no capítulo 4, mostrou que há uma dificuldade na extração das oscilografias que são armazenadas na base de dados. As medições oscilográficas realizadas pelo medidor só podem ser extraídas em um tempo não menor a 5 minutos, característica que limita implementação de metodologias de identificação em tempo real. Além da limitação anterior, o cálculo das componentes harmônicas, segundo apresentado no capítulo, difere de forma considerável do cálculo de harmônicas feito no Matlab®. O anterior supõe o truncamento de informação que poderia ser de vital importância na detecção de FAI, motivo pelo qual neste trabalho foram utilizados os sinais das correntes amostrados com uma taxa de 128 amostras por ciclo.

No capítulo 7 foram analisadas as oscilografias das ocorrências de cabo rompido acontecidas no circuito A num período de sete meses. Tal análise evidenciou a dificuldade existente na identificação visual de eventos que pudessem ser associados ao rompimento do condutor e a um evento de FAI. Dos 7 casos que foram analisados, em 5 deles não foi possível identificar de forma visual o instante de rompimento do condutor, embora fosse identificado um evento com possibilidade de ser FAI.

A partir do estudo feito com ATP e da análise de sinais reais feito neste trabalho, foi possível concluir que a simulação de um circuito com todas suas cargas, não consegue simular todas as comutações de cargas lineares e não lineares, *sags*, *swells*, curtos e demais eventos que acontecem diariamente num circuito real. Os sinais de corrente medidos em ATP diferem muito dos sinais de corrente capturados pelo G4430. Tal fato constitui a maior dificuldade que enfrenta a aplicação real das metodologias de identificação de FAI. Devido a isto, foi

necessário ajustar os limiares estabelecidos bem como serem propostos novos limiares para que as metodologias conseguissem se adaptar ao comportamento do circuito A.

Um possível caso de FAI descrito no capítulo 7 foi usado para calibrar os limiares da metodologia 2. Assim, a metodologia conseguiu detectar o provável evento de FAI, mas nenhum outro evento de FAI foi detectado na oscilografia das ocorrências de cabo partido analisadas no capítulo 7. A falta de informação com respeito à presença ou não de uma FAI, nas ocorrências de cabo rompido analisadas, limita a assertividade da identificação das metodologias de identificação propostas neste trabalho.

Os resultados alcançados neste trabalho mostraram que não é possível desenhar metodologias de identificação de FAI em sistemas de distribuição multiterrados, utilizando como base os sinais simulados em ATP. As simulações de FAI permitem observar mais facilmente as características das FAI, mas não constituem o material com o qual devem ser calibradas as metodologias de identificação. Esta conclusão também foi escrita em Masa (2013).

Para garantir a assertividade da identificação de FAI em sistemas de distribuição multiterrados (SDM), é necessário dispor de vários sinais reais de FAI medidos em SDM. A existência de sinais de FAI gerados em laboratório não garante a criação de uma metodologia exata. Tal conclusão é um fato real: os algoritmos presentes em medidores comerciais foram ajustados com FAI simuladas em laboratório e em redes simplificadas, segundo o apresentado no capítulo 2, mas até hoje estes medidores não conseguem cobrir todo o universo da FAI.

9.1 Propostas de continuidade da pesquisa

A seguir serão listadas algumas propostas que podem ser pesquisadas ou implementadas como continuidade do trabalho desenvolvido. As propostas visam melhoras na detecção de FAI no circuito em estudo.

- Implementação em hardware das metodologias propostas neste trabalho, levando com isto um estudo mais aprofundado da complexidade computacional requeridos pelas metodologias.

- Contato com grupos de pesquisa e concessionárias que tenham sinais reais de FAI, com o propósito de intercambiar experiências na detecção de FAI e ter disponibilidade de FAI reais para melhorar o ajuste das metodologias propostas.
- Análise das ocorrências de cabo rompido acontecidas nos outros circuitos que compõem a subestação estudada. Com isto, torna-se possível ampliar a quantidade de eventos com os quais possam ser calibradas as metodologias de detecção propostas. Além disto, a disponibilidade das oscilografias dos demais circuitos, em conjunto com o relatório de ocorrências da concessionária e o relatório de atuação dos elementos instalados em subestação, permitiria construir uma boa base de dados com a qual avaliar diversas metodologias de identificação e localização de faltas.
- Acesso às medições dos clientes de média tensão e as medições das religadoras automáticas que estivessem instaladas no circuito. Tal informação em conjunto com as metodologias propostas ampliaria enormemente a certeza da detecção de FAI.
- Determinar a largura da banda de frequências coberta pelo medidor de qualidade, o que poderia ser feito reproduzindo casos reais de FAI medidos com algum outro instrumento. Isto permitirá determinar se há existência de componentes de frequência geradas pela FAI que não são possíveis de medir utilizando o medidor.

10 Referências bibliográficas

- **Alternative Transient Program Rule Book** (1987).
- ARRILLAGA, J., WATSON, N. (2003). **Power systems electromagnetic transients simulation**. IEE power and energy series, no. 39, UK, 2003, p.123.
- BARROS, A. C. (2009). **Deteção e classificação de faltas de alta impedância em sistemas elétricos de potência usando lógica fuzzy**. 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2005.
- **Black Box User & Installation Guide**. (2013). Elspec® G4K fixed power quality analyser.
- CARPENTER, M., HOAD, R. F., BRUTON, T. D., DAS, R., KUNSMAN, S. A., PETERSON, J. M. **Staged-fault for high impedance fault data collection**. IEEE 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2013. 9p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1430417>>. Acesso em: Out. 2014.
- CUPERTINO de L, P. (2002). **Wavelets: uma introdução**, Revista Matemática Universitária – Sociedade Brasileira de Matemática, No.33, pp. 13-44.
- DAQING, H. **High-impedance fault detection – field tests and dependability analysis**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 2009. 10 p. Disponível em: <<https://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6376>>. Acesso em: Out. 2014.
- DAS, R., BAYOUMI, D. **System for detection of high impedance fault**. CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution, 2007. 8 p. Disponível em: <<http://store.gedigitalenergy.com/FAQ/Documents/DFP200/GER-3993.pdf>>. Acesso em: Out. 2014.
- DAS, R., KUNSMAN, S. A. **A novel approach for ground fault detection**. 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers. Texas A&M University, 2004. 14p. Disponível em:< <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1287088>>.Acesso em: Out. 2014.
- DA SILVA, J. A. C. B., COSTA, F. B., SANTOS W. C., NEVES, W. L. A., SOUZA, B. A. **High impedance fault location – case study using wavelet transform and artificial**

- neural networks.** CIRED 22nd International Conference on Electricity distribution. Stockholm, Sweden, 2013. 4 p. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6683471>>. Acesso em: Out. 2014.
- ELKALASHY, N. I., DARWISH, H. A. **Universal Arc representation using EMTP.** IEEE Transactions on Power Delivery, 2005. Vol. 20, No. 2 8 p. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1413315>>. Acesso em: Out. 2014.
 - ELKALASHY, N. I., LEHTONEN, M., DARWISH, H. A., IZZULARAB, M. A., TAALAB, A. M. **Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007. 9 p. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4150605>> .Acesso em: Out. 2014.
 - EMANUEL, A. E., CYGANSKI, D., ORR, J. A., GULACHEMSKI. **High impedance fault arcing on sandy soil in 15kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum.** IEEE Transactions on Power Delivery, 1990. Vol. 5, No 2, 11 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4150605>>. Acesso em: Out. 2014.
 - ETEMADI, A. H., PASAND, M. **High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system.** IET generation, transmission & distribution, 2008. Vol. 2, No 1, 9 p. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4436111>>. Acesso em: Out. 2014.
 - FARINA, O. D. **Uma contribuição para a detecção de faltas fase-terra de alta impedância.** 2012. 156 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
 - GLIK, K., DAUPHIN, D. **Travelling wave fault location algorithm in HV lines – simulation test results for Arc and high impedance faults.** Institute of Electrical Power Engineering. EuroCon, Zagreb, Croatia, 2013. 7 p. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6625063>>. Acesso em: Out. 2014.

- KAWADY, T. A., TAALAB, A. E. M., ELGEZIRY, M. **Experimental investigation of high impedance faults in low voltage distribution networks**. IEEE Power and energy society general meeting. Calgary, Canada, 2009. 6 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5275248>>. Acesso em: Out. 2014.
- LOPES, F. V., SANTOS, W. C., FERNANDES, D., NEVES, W. L. A., BRITO, N. S. D., SOUZA, B. A. **A transient based approach to diagnose high impedance faults on smart distribution networks**. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. São Paulo, Brasil, 2013. 8 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6554450>>. Acesso em: Out. 2014.
- MASA, A. V. **High impedance fault detection method in multi-grounded distribution networks**. 2013. 182 p. Tese (Doutorado) - École Polytechnique de Bruxelles, Université Libre de Bruxelles, Bruxelas, 2013.
- MASA, A. V., MAUN, J. C., WERBEN, S. **Incorporation of data-mining in protection technology for high impedance fault detection**. IEEE Power and Energy Society general meeting. San Diego, California, EEUA, 2012. 10 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6344893>>. Acesso em: Out. 2014.
- MASA, A. V., MAUN, J. C., WERBEN, S. **Characterization of high impedance faults in solidly grounded distribution networks**. 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm, Sweden, 2011. 6 p. Disponível em: <http://pscc.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/fp40.pdf>. Acesso em: Out. 2014.
- MAYR, O. (1943). **Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens**. Archiv für Electrotechnik, v. 37, p. 588-608.
- NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição**. 2006. 90 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- NAM, S. R., PARK, J. K., KANG, Y. C., KIM, T. H. **A modeling method of a high impedance fault in a distribution systems using two series time-varying resistance in EMTP**. Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. Vol. 2. 6 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=970231>>. Acesso em: Out. 2014.

- **PQS User Manual SMX-0619-0102.** ELSPEC®, V1.1, 356 p 2012. Disponível em: <<http://www.elspec.biz/PQSCADA/PQS%20User%20Manual%20SMX-0619-0102%20V1.1.pdf>>. Acesso em: Out. 2014.
- RUSSELL, B. D., AUCCOIN, M. **Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982. 11 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4111496>>. Acesso em: Out. 2014.
- RUSSELL, B. D., AUCCOIN, M., BENNER, C. L., JONES, R. H., LEE, R. E., CARR, J., ELMORE, W. A., GRIFFIN, C. H., VOLZKA, D. R., REEDY, R. M. **Detection of downed conductors on utility distribution systems.** IEEE Tutorial Course, 1989. 48 p.
- SAMANTARAY, B. K., PANIGRAHI, B. K., DASH, P. K. **High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network.** IET Generation, Transmission & Distribution, 2008. Vol. 2, No 2. 10 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4459242>>. Acesso em: Out. 2014.
- SANTOS, W. C., COSTA, F. B., SILVA, J. A. C. B., LIRA, G. R. S., SOUZA, B. A., BRITO, N. S. D., PAES JUNIOR, M. R. C. **Automatic building of a simulated high impedance fault database.** IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and exposition: Latin America. São Paulo, Brasil, 2010. 10 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5762936>>. Acesso em: Out. 2014.
- SANTOS, W. C., COSTA, F. B., BRITO, N. S. D., SOUZA, B. A. **Considerações sobre diferentes maneiras de modelagem de faltas de alta impedância.** IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia, Goiás, Brasil, 2012. 10 p. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/97055.PDF>>. Acesso em: Out. 2014.
- 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.** IET generation, transmission & distribution, 2011. Vol. 5, Iss. 5, pp. 588–595. Disponível em: <<http://www.jatit.org/volumes/Vol53No2/4Vol53No2.pdf>>. Acesso em: Out. 2014.

- SEDIGHI, A. R., HAGHIFAM, M. R. **Simulation of high impedance ground fault in electrical power distribution systems**. IEEE international conference on power system technology. Hangzhou, China, 2010. 10 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5666061>>. Acesso em: Out. 2014.
- SENER, E. C., PELLINI, E. L., MANASSERO, G. **Proposta de proteção de alta sensibilidade para detecção de falta de alta impedância**. X Seminário Técnico de Proteção e Controle, Recife, 2010. 10 p.
- SENER, E. C., PELLINI, E. L., MANASSERO, G., REIS, F., RUFATO, E. **Custom distribution feeder recloser IED with high impedance protection function**. 22nd International Conference on Electricity Distribution. CIRED, Stockholm, Sweden, 2013. 4 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6683613>>. Acesso em: Out. 2014.
- SHEBL, K. M., BADRAN, E. A., ABDALLA, E. **A combined MODEL-TACS ATPdraw general model of the high impedance faults in distribution networks**. Proceeding of the 14th International Middle East Power Systems Conference. Cairo, Egipto, 2010. 10 p. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/228413262_A_Combined_MODELS-TACS_ATPdraw_General_Model_of_the_High_Impedance_Faults_in_Distribution_Networks>. Acesso em: Out. 2014.
- **SMX-0602-0100 G4K User & Installation Guide**. ELSPEC®, V1.2, 300 p 2013. Disponível em: www.elspec-ltd.com/download/file/fid/826>. Acesso em: Out. 2014.
- THOMAS, D. W. P., PEREIRA, E. T., CHRISTOPOULOS, C., HOWE, A. F. **The simulation of circuit breaker switching using a composite Cassier-modified Mayr model**. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995. v. 10, n. 7, p. 1829-1835. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=473373>>. Acesso em: Out. 2014.
- VEGA, V.; DUARTE, C.; ORDONEZ, G.; KAGAN, N. **Selecting the best wavelet function for power quality disturbances identification patterns**. 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, Australia, 2008. 6 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4668863>>. Acesso em: Out. 2014.

- WESTER, C., ADAMIAK, M., THAKUR, M., JENSEN, C. **High impedance fault detection on distribution feeders**. General Electric. 2000. 10 p. Disponível em: <<http://store.gedigitalenergy.com/faq/Documents/F60/HizFeeder.pdf>>. Acesso em: Out. 2014.
- ZANJANI, M. G. M., KARGAR, H. K., ZANJANI, M. G. M. **High impedance fault detection of distribution networks by phasor measurement units**. IEEE electrical power distribution networks. Teherán, Iran, 2012. 10 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6254586>>. Acesso em: Out. 2014.

ANEXO A. Teoria da transformada wavelet

A TF pode ser vista como um mecanismo para decompor ou quebrar sinais nas suas partes constituintes, permitindo analisar os dados em diferentes domínios de frequência com a resolução de cada componente amarrada a sua escala. Além disso, na análise de wavelets, podemos usar funções que estão contidas em regiões finitas, tornando-as convenientes na aproximação de dados com descontinuidades.

O princípio mais geral na construção das wavelets é o uso de dilatações e translações. As wavelets mais usadas constituem um sistema ortonormal de funções com suportes compactos. Esta é a razão pela qual elas podem distinguir as características locais de um sinal em diferentes escalas e, por translações, elas cobrem toda a região na qual o sinal é estudado. Na análise de sinais não-estacionários, a propriedade de localidade das wavelets nos conduz as suas vantagens sobre a TF.

Os algoritmos de wavelets processam dados em diferentes escalas ou resoluções e, independentemente da função de interesse ser uma imagem, uma curva ou uma superfície, wavelets oferecem uma técnica elegante na representação dos níveis de detalhes presentes. Elas constituem uma ferramenta matemática para decompor funções hierarquicamente, permitindo que uma função seja descrita em termos de uma forma grosseira, mais outra forma que apresenta detalhes que vão desde os menos delicados aos mais finos. O objetivo na análise de wavelets é “ver a floresta e as árvores”.

Por causa de suas propriedades únicas, wavelets são usadas em análises funcionais em matemática, em estudo de propriedades (multi) fractais, singularidades ou oscilações locais de funções, em solução de equações diferenciais, em reconhecimento de padrões, em compressão de imagens e de sons, em processamento de geometria digital, na solução de vários problemas da física, biologia, medicina, astronomia, acústica, engenharia nuclear, grupo de renormalização em mecânica estatística, problemas de computação gráfica, neurofisiologia,

música, ressonância magnética, identificados de vozes, ótica, fractais, turbulência, previsão de terremotos, radar, visão humana (Cupertino 2002).

Fundamentos matemáticos

A wavelet pode ser processada utilizando diferentes escalas ou resoluções. Inicialmente, a transformada wavelet é considerada como um sinal contínuo $f(t)$, e dada pela equação A.1, onde o parâmetro a representa a escala (resolução) e o parâmetro b representa o deslocamento (translação). A função $\psi_{a,b}(t)$ chamada “wavelet”, é derivada de uma função $\psi(t)$ através da transformação apresentada na equação A.2.

$$F(a,b) = \int f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (A.1)$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (A.2)$$

A análise de wavelet permite a utilização de intervalos longos de tempo para encontrar as informações de baixa frequência, e intervalos curtos de tempo onde estão localizadas as informações de alta frequência. Existem diversas possibilidades de escolha para a função $\psi(t)$, denominada “wavelet mãe”. Algumas alternativas são apresentadas na Figura A.1.

Figura A.1 – Exemplos de wavelets mãe.

Fonte: (Cupertino 2002).

No processo de decomposição dos sinais, dois coeficientes são gerados: aproximação (A), que são os componentes de baixa frequência (*Low-Pass*), e detalhe (D), que corresponde aos componentes de alta frequência (*High-Pass*), conforme é ilustrado na Figura A.2.

Figura A.2 – Processo de decomposição das wavelets.

Fonte: Adaptado de (Cupertino 2002).

Para decomposição em dois ou mais níveis, o processo adota o último coeficiente de aproximação (A) para gerar outros dois coeficientes de aproximação e detalhe, e assim, sucessivamente até que o último nível seja decomposto, como se observa na Figura A.3.

Figura A.3 – Árvore de três níveis de decomposição wavelet.

Fonte: Adaptado de (Cupertino 2002).

Transformada wavelet continua

A transformada wavelet Continua (TWC) é definida a partir de um espaço de funções ortonormais, denominado baixas wavelets, as quais formam uma base de funções da TW. Assim, a CWT é definida como o produto interno na forma dada pela equação A.3.

$$CWT_{f(a,b)} = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \int f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) \cdot dt \quad (A.3)$$

Onde $\psi_{a,b}(t)$ é a “wavelet mãe”, e os parâmetros a e b estão apresentados pela transformação da equação A.2.

A TWC constitui-se da soma de todos os sinais $f(t)$ no tempo, multiplicados por versões de escala e deslocamento da função wavelet ψ , conforme na equação A.3, tendo como resultados vários coeficientes wavelet C , a qual é uma função de escala e posição.

$$C(escala, posicao) = \int f(t) \psi(escala, posicao, t) dt \quad (A.4)$$

O fator de escala em wavelet representa simplesmente a forma de expandir ou comprimir um sinal, e o fator posição pode ser entendido como o deslocamento do sinal, através do seu retardo ou avanço do seu ponto inicial.

Transformada wavelet discreta (TWD)

Translações e dilatações da “Função-Mãe” ou “Análise Wavelet” $\Phi(x)$, definem uma base ortogonal, denominada bases wavelet, conforme mostra a equação A.5, onde as variáveis s e l são inteiras, e representam respectivamente a escala e localização da função mãe $\phi(x)$ para gerar as wavelets, como por exemplo, a família de wavelets Daubechies. O índice de escala s indica o tamanho da wavelet, e o índice de localização l a sua posição.

$$\Phi_{(s,l)}(x) = 2^{-\frac{s}{2}} * \Phi(s^{-s}x - 1) \quad A.5$$

Para estender o domínio de dados em diferentes resoluções, a análise wavelet é usada em uma equação escalar, dada pela equação A.6, onde $W(x)$ é a função escala da função-mãe Φ , e C_k são os coeficientes wavelets, que devem satisfazer as condições linear e quadrática na forma dada pela equação A.7, onde δ é a função delta e l é o índice de localização.

$$W(x) = \sum_{k=-1}^{N-2} (-1)^k c_{k+1} \Phi(2x + k) \quad (A.6)$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} C_k = 2, \quad \sum_{k=0}^{N-1} C_k C_{k+2l} = 2\delta_{l,0} \quad (A.7)$$

A TWD é implementada por uma sequência de filtragens digitais sobre o sinal original, de acordo com um algoritmo conhecido como codificação sub-banda, onde um par de filtros digitais, definidos como filtros em quadratura ou QMF (*Quadrature Mirros Filters*), é representado pelas funções $h(n)$ e $g(n)$, que são, respectivamente, as funções resposta ao impulso de um filtro Passa-Baixa (*Low-Pass*) e Passa-Alta (*High-Pass*), cada um com a metade da banda do sinal original.

A Figura A.4 apresenta a execução da TWD em um sinal unidimensional, representado por uma senóide com ruído de alta frequência adicionado a ele.

Figura A.4 – Análise de um sinal 1-D através da DWT.

Fonte: Adaptado de (Cupertino 2002).

A Figura A.5 apresenta os intervalos de frequência para uma árvore de três níveis de decomposição, onde F_s é a frequência de amostragem do sinal e $F_s = 60 * 512 = 30720\text{Hz}$.

Figura A.5 – Intervalos de frequência para três níveis de decomposição ($F_s=30720\text{Hz}$).

Fonte: Adaptado de (Cupertino 2002).

ANEXO B. Dados específicos da rede A

Valores das potências de curto circuito da rede A (130,0/13,8 kV)

Potência de curto trifásico = 1.013,60 $\angle$ - 82,02° MVA

Potência de curto fase-terra = 589,50 $\angle$ - 78,13° MVA

Impedância de Sequência Positiva – Z1 = 0,0986 $\angle$ 82,02° pu

Impedância de Sequência Zero – Z0 = 0,3123 $\angle$ 75,67° pu

TR 1 – 40/60 MVA 131,6/13,8 kV

Z1 = 0,6490 $\angle$ 90° - Base 100,0 MVA 138,0kV

Valores dos trechos da rede A

Barra1	Barra2	Comprimento (m)	R0 (Ω)	X0 (Ω)	R1 (Ω)	X1 (Ω)
B_3	B_773	34,4	0,0131	0,0459	0,00253	0,0123
B_735	B_774	0,43	0,000421	0,000602	0,00026	0,000141
B_735	B_732	17,4	0,00865	0,0219	0,00331	0,00491
B_735	B_736	15,9	0,00791	0,02	0,00303	0,00448
B_732	B_733	15,1	0,00754	0,019	0,00289	0,00427
B_733	B_734	17,1	0,00853	0,0215	0,00327	0,00484
B_734	B_241	32,4	0,0161	0,0408	0,00618	0,00915
B_241	B_259	29,1	0,0145	0,0367	0,00556	0,00823
B_241	050ET017397	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_259	B_481	32,4	0,0161	0,0408	0,00618	0,00915
B_259	050IP017762	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_481	B_482	32,2	0,0161	0,0406	0,00615	0,00911
B_482	B_483	37,3	0,0186	0,047	0,00713	0,0105
B_483	B_484	35,4	0,0176	0,0445	0,00675	0,00999
B_484	B_485	27,3	0,0136	0,0343	0,00521	0,00771
B_485	B_775	10	0,00498	0,0126	0,00191	0,00282
B_6	B_486	18,4	0,00919	0,0232	0,00352	0,00521
B_486	B_487	37,2	0,0185	0,0468	0,0071	0,0105

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_487	B_489	38,8	0,0193	0,0489	0,00741	0,011
B_487	B_488	14,8	0,00735	0,0186	0,00282	0,00417
B_489	B_433	28,8	0,0144	0,0363	0,0055	0,00815
B_488	B_242	16,3	0,00811	0,0205	0,00311	0,0046
B_433	B_776	8,06	0,00788	0,0113	0,00487	0,00264
B_433	B_434	17,2	0,00857	0,0216	0,00328	0,00486
B_242	B_432	35,2	0,067	0,0507	0,0539	0,0129
B_242	050ET241336	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_434	B_436	12	0,006	0,0152	0,0023	0,0034
B_432	B_568	37	0,0185	0,0466	0,00707	0,0105
B_8	B_435	12,2	0,0232	0,0176	0,0187	0,00448
B_436	B_437	11,4	0,00568	0,0143	0,00218	0,00322
B_435	B_260	35,8	0,0681	0,0516	0,0547	0,0131
B_437	B_438	15	0,00749	0,0189	0,00287	0,00425
B_260	B_243	21,4	0,0407	0,0308	0,0327	0,00785
B_260	050IP400997	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_438	B_442	41,1	0,0205	0,0517	0,00784	0,0116
B_243	B_439	23	0,0438	0,0332	0,0352	0,00844
B_243	050ET014738	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_442	B_443	12,4	0,00616	0,0156	0,00236	0,00349
B_439	B_440	54,6	0,104	0,0787	0,0835	0,02
B_443	B_448	23,1	0,0115	0,0291	0,00441	0,00652
B_443	B_444	13,9	0,00694	0,0175	0,00266	0,00393
B_440	B_441	40,8	0,0776	0,0588	0,0624	0,015
B_444	B_445	29,4	0,0147	0,037	0,00561	0,00831
B_445	B_446	34,2	0,017	0,0431	0,00653	0,00966
B_446	B_447	35,7	0,0178	0,045	0,00682	0,0101
B_447	050ET028734	1,94	0,0019	0,00272	0,00117	0,000635
B_447	B_449	32,6	0,0162	0,041	0,00621	0,0092
B_449	B_450	30,1	0,015	0,0379	0,00574	0,0085
B_450	B_451	33,8	0,0169	0,0426	0,00646	0,00956
B_451	B_452	30,4	0,0152	0,0383	0,0058	0,00859
B_452	B_454	15	0,00749	0,0189	0,00287	0,00425
B_452	B_453	16,1	0,00803	0,0203	0,00308	0,00455
B_454	B_455	37,3	0,0186	0,047	0,00713	0,0105
B_455	B_261	42,1	0,021	0,053	0,00804	0,0119
B_261	B_777	20	0,00998	0,0252	0,00382	0,00565
B_261	050IP017765	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_12	B_456	20,2	0,0101	0,0255	0,00386	0,00571
B_456	B_457	28,2	0,014	0,0354	0,00537	0,00795
B_457	B_779	29	0,0144	0,0365	0,00553	0,00819
B_457	B_458	10	0,00498	0,0126	0,00191	0,00282
B_458	B_459	34	0,0169	0,0428	0,00649	0,0096
B_24	B_245	18	0,00898	0,0227	0,00344	0,00509
B_459	B_460	15	0,00747	0,0189	0,00286	0,00424

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_245	B_463	20	0,00997	0,0252	0,00382	0,00565
B_245	050ET014737	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_460	B_461	14	0,00698	0,0176	0,00267	0,00395
B_463	B_464	21	0,0105	0,0264	0,00401	0,00593
B_461	B_244	32	0,016	0,0403	0,00611	0,00904
B_464	B_468	12	0,006	0,0152	0,0023	0,0034
B_244	B_462	24,1	0,012	0,0303	0,00459	0,0068
B_244	050ET244231	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_468	B_713	15	0,0147	0,021	0,00907	0,00491
B_462	B_465	5	0,00489	0,007	0,00302	0,00164
B_462	B_262	19,2	0,00959	0,0242	0,00367	0,00543
B_713	B_714	36	0,0352	0,0504	0,0218	0,0118
B_465	B_780	19,6	0,0192	0,0275	0,0119	0,00642
B_262	B_466	10,2	0,00508	0,0128	0,00195	0,00288
B_262	050IP017766	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_714	B_715	34,6	0,0339	0,0485	0,0209	0,0113
B_466	B_467	34	0,0169	0,0428	0,00649	0,00961
B_26	B_476	18,4	0,018	0,0258	0,0112	0,00604
B_467	B_473	20,6	0,0103	0,0259	0,00393	0,00582
B_467	B_469	14,8	0,0144	0,0207	0,00893	0,00483
B_476	B_477	21,4	0,0209	0,03	0,0129	0,00701
B_473	B_474	19,2	0,00959	0,0242	0,00367	0,00543
B_469	B_470	21,4	0,0209	0,03	0,0129	0,00701
B_477	B_478	35,4	0,0176	0,0445	0,00675	0,00999
B_474	B_475	33,1	0,0165	0,0417	0,00632	0,00936
B_470	B_471	15,8	0,0155	0,0221	0,00956	0,00518
B_478	B_155	23,8	0,0118	0,0299	0,00454	0,00671
B_475	B_778	7,54	0,00676	0,00986	0,00456	0,00247
B_475	B_247	17,9	0,00891	0,0225	0,00341	0,00505
B_471	B_472	33,2	0,0325	0,0466	0,0201	0,0109
B_155	B_156	30,4	0,0152	0,0383	0,0058	0,00859
B_247	B_480	10,8	0,00539	0,0136	0,00206	0,00306
B_247	050ET011713	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_472	B_246	23,4	0,0229	0,0328	0,0142	0,00767
B_156	B_716	14,2	0,0139	0,0199	0,00861	0,00466
B_156	050ET009162	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_15	B_560	26,9	0,0263	0,0377	0,0163	0,00882
B_480	B_157	8,94	0,00445	0,0113	0,00171	0,00253
B_246	B_479	17,7	0,0173	0,0248	0,0107	0,0058
B_246	050ET043049	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_716	B_162	8,76	0,00857	0,0123	0,0053	0,00287
B_716	B_717	6,35	0,00621	0,0089	0,00384	0,00208
B_560	B_561	24	0,0235	0,0337	0,0145	0,00787
B_157	050IP017774	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_157	B_158	30,5	0,0152	0,0384	0,00583	0,00862

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_162	050IP017767	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_162	B_163	9	0,00448	0,0113	0,00172	0,00254
B_717	050ET400243	4,7	0,00234	0,00592	0,000897	0,00133
B_561	B_562	14,3	0,014	0,0201	0,00866	0,00469
B_158	B_19	19,2	0,00956	0,0241	0,00366	0,00542
B_158	B_159	24,1	0,012	0,0303	0,00459	0,0068
B_163	B_164	29	0,0145	0,0365	0,00554	0,0082
B_562	B_563	36,4	0,0356	0,0509	0,022	0,0119
B_19	B_503	16,2	0,00806	0,0204	0,00309	0,00457
B_159	B_160	32,3	0,0161	0,0406	0,00616	0,00912
B_164	B_166	37,1	0,0362	0,0519	0,0224	0,0121
B_164	B_165	31,1	0,0155	0,0392	0,00594	0,0088
B_563	B_564	22	0,0215	0,0308	0,0133	0,00721
B_503	B_504	17,5	0,00871	0,022	0,00334	0,00494
B_160	B_161	33	0,0164	0,0415	0,00629	0,00932
B_166	B_167	36	0,0352	0,0504	0,0218	0,0118
B_564	B_565	15	0,0147	0,0211	0,00909	0,00492
B_504	B_505	19,7	0,00983	0,0248	0,00376	0,00557
B_161	050ET066282	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_167	050ET091295	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_167	B_170	35,1	0,032	0,0458	0,0212	0,0115
B_565	B_218	30,8	0,0301	0,0432	0,0186	0,0101
B_505	B_506	23,8	0,0118	0,0299	0,00454	0,00671
B_218	050ET028730	3,31	0,00165	0,00417	0,000632	0,000935
B_218	B_219	39,3	0,0384	0,055	0,0238	0,0129
B_506	B_507	12	0,006	0,0152	0,0023	0,0034
B_219	050ET401162	2,54	0,00127	0,0032	0,000485	0,000717
B_219	B_220	39,6	0,0197	0,0498	0,00755	0,0112
B_507	B_168	12	0,00598	0,0151	0,00229	0,00339
B_220	B_221	33	0,0164	0,0415	0,00629	0,00932
B_168	050ET019068	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_168	B_169	32,1	0,016	0,0405	0,00613	0,00908
B_221	B_222	13,6	0,00678	0,0171	0,0026	0,00384
B_169	B_172	16	0,00799	0,0202	0,00306	0,00453
B_169	B_171	29,4	0,0288	0,0486	0,0178	0,00963
B_222	B_223	19,6	0,00979	0,0247	0,00375	0,00555
B_172	050IP035102	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_172	B_175	15	0,00747	0,0189	0,00286	0,00424
B_171	B_173	25,9	0,0259	0,0432	0,0157	0,00849
B_223	050ET241118	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_223	B_224	31,1	0,0304	0,0435	0,0188	0,0102
B_175	B_176	19,1	0,00952	0,0241	0,00365	0,0054
B_173	B_174	17,5	0,0174	0,0291	0,0106	0,00573
B_176	B_177	18,7	0,00931	0,0235	0,00356	0,00528
B_174	050ET036395	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_177	B_178	18,4	0,00916	0,0231	0,00351	0,00519
B_178	B_179	14,2	0,00708	0,0179	0,00271	0,00401
B_179	B_180	14,1	0,00705	0,0178	0,0027	0,00399
B_180	B_388	20,8	0,0104	0,0262	0,00397	0,00588
B_388	B_389	34,5	0,0172	0,0434	0,00658	0,00974
B_389	B_390	38,6	0,0192	0,0486	0,00736	0,0109
B_390	B_36	31,3	0,0156	0,0394	0,00597	0,00884
B_181	B_781	37,6	0,0187	0,0473	0,00717	0,0106
B_181	B_185	16,1	0,00803	0,0203	0,00308	0,00455
B_181	B_182	19,2	0,00957	0,0242	0,00367	0,00543
B_185	B_738	22	0,0109	0,0276	0,00419	0,0062
B_185	050ET050332	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_182	B_183	24,8	0,0123	0,0312	0,00472	0,00699
B_738	B_739	34,5	0,0172	0,0434	0,00658	0,00974
B_183	B_184	32,3	0,0161	0,0406	0,00616	0,00912
B_739	B_740	16,1	0,00803	0,0203	0,00308	0,00455
B_184	B_263	1,22	0,000608	0,00154	0,000233	0,000345
B_184	B_186	34	0,0169	0,0428	0,00649	0,0096
B_740	B_741	18	0,00898	0,0227	0,00344	0,00509
B_741	B_742	21,4	0,0107	0,0269	0,00408	0,00604
B_742	B_743	24	0,012	0,0302	0,00458	0,00678
B_743	B_744	21	0,0105	0,0265	0,00401	0,00594
B_744	B_746	17,2	0,00857	0,0216	0,00328	0,00486
B_744	B_745	7,28	0,00726	0,0121	0,0044	0,00238
B_746	050IP017769	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_746	B_747	17,9	0,00891	0,0225	0,00341	0,00505
B_745	B_782	6,62	0,0066	0,011	0,004	0,00217
B_747	B_748	28,2	0,0141	0,0355	0,00539	0,00797
B_748	B_749	22,4	0,0111	0,0281	0,00427	0,00632
B_39	B_187	21,9	0,0219	0,0365	0,0133	0,00718
B_749	B_750	18,1	0,00902	0,0228	0,00346	0,00512
B_187	050ET014705	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_187	B_188	15,6	0,0153	0,0219	0,00945	0,00511
B_750	B_751	18	0,00898	0,0227	0,00344	0,00509
B_188	B_193	28,3	0,0282	0,0471	0,0171	0,00926
B_751	B_752	18	0,00897	0,0227	0,00343	0,00508
B_193	B_194	25	0,0249	0,0416	0,0151	0,00818
B_752	B_189	14	0,00698	0,0176	0,00267	0,00395
B_194	B_195	41,1	0,041	0,0684	0,0249	0,0135
B_189	B_495	17	0,00847	0,0214	0,00324	0,0048
B_189	B_190	5,66	0,00282	0,00712	0,00108	0,0016
B_195	B_199	38	0,0379	0,0633	0,023	0,0124
B_495	B_783	14,3	0,00711	0,0179	0,00272	0,00403
B_190	B_191	6,32	0,00315	0,00795	0,00121	0,00179
B_199	050ET032265	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_191	B_192	26,7	0,0133	0,0336	0,00509	0,00753
B_43	B_197	16,2	0,00805	0,0203	0,00308	0,00456
B_192	B_196	19,3	0,00964	0,0243	0,00369	0,00546
B_197	B_198	24,5	0,0138	0,0332	0,00468	0,00693
B_196	B_494	13	0,00648	0,0164	0,00248	0,00367
B_196	050ET089427	1,14	0,000568	0,00143	0,000218	0,000322
B_198	B_200	20,1	0,01	0,0253	0,00384	0,00568
B_200	B_201	32,2	0,0161	0,0406	0,00615	0,00911
B_201	B_724	25,1	0,0125	0,0316	0,00479	0,00708
B_201	050ET066191	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_724	B_725	35,2	0,0176	0,0443	0,00672	0,00995
B_725	B_726	32,1	0,016	0,0405	0,00613	0,00908
B_726	B_727	25	0,0125	0,0315	0,00477	0,00707
B_727	B_728	32,1	0,016	0,0404	0,00612	0,00906
B_728	B_729	29	0,0145	0,0365	0,00554	0,0082
B_729	B_730	14	0,00698	0,0176	0,00267	0,00395
B_730	050ET249252	2,87	0,00281	0,00402	0,00174	0,000939
B_730	B_731	16	0,00797	0,0201	0,00305	0,00452
B_731	B_202	11	0,00551	0,0139	0,00211	0,00312
B_202	B_45	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_202	B_203	13	0,0065	0,0164	0,00249	0,00368
B_203	B_204	20	0,00997	0,0252	0,00382	0,00565
B_204	B_205	7,81	0,00389	0,00983	0,00149	0,00221
B_205	B_688	10,2	0,00506	0,0128	0,00194	0,00287
B_205	B_687	13,5	0,0067	0,0169	0,00257	0,0038
B_688	B_689	12,1	0,00605	0,0153	0,00232	0,00343
B_687	050IP017776	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_689	B_784	0,25	0,000245	0,00035	0,000151	8,18E-05
B_689	B_692	31	0,0154	0,039	0,00591	0,00875
B_690	B_47	11,3	0,00358	0,0148	0,00135	0,00399
B_690	B_691	7,1	0,00225	0,0093	0,000849	0,00251
B_691	B_384	11,3	0,00357	0,0148	0,00135	0,00397
B_384	B_385	8,18	0,00259	0,0107	0,000978	0,00289
B_385	B_386	13,9	0,00443	0,0183	0,00167	0,00492
B_386	B_387	16,1	0,00511	0,0211	0,00193	0,00569
B_387	B_693	15,4	0,0049	0,0202	0,00185	0,00545
B_693	B_694	15,8	0,005	0,0207	0,00189	0,00557
B_694	B_785	18,1	0,00573	0,0237	0,00216	0,00638
B_48	B_697	1,42	0,00139	0,00199	0,000859	0,000465
B_697	B_695	18,4	0,00584	0,0241	0,0022	0,00649
B_697	B_698	16,8	0,00835	0,0211	0,0032	0,00473
B_695	B_696	16,3	0,00519	0,0214	0,00196	0,00577
B_698	B_699	36,7	0,0183	0,0462	0,007	0,0104
B_699	B_206	33,8	0,0169	0,0426	0,00646	0,00956
B_206	B_207	23,4	0,011	0,0294	0,00378	0,0066

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_207	B_208	31,8	0,0176	0,0516	0,00516	0,00899
B_208	B_209	31,8	0,0176	0,0516	0,00516	0,00899
B_209	B_210	26,9	0,0149	0,0435	0,00435	0,00759
B_210	B_225	3,61	0,0036	0,00601	0,00218	0,00118
B_210	B_211	28,4	0,0157	0,046	0,00461	0,00803
B_225	B_226	5,39	0,00537	0,00897	0,00326	0,00176
B_211	B_212	30,2	0,0167	0,049	0,0049	0,00854
B_226	B_227	24,2	0,0241	0,0403	0,0146	0,00792
B_212	B_213	25	0,0138	0,0405	0,00405	0,00706
B_227	B_228	41,1	0,041	0,0685	0,0249	0,0135
B_213	B_766	32,6	0,0153	0,041	0,00528	0,00921
B_213	050ET029184	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_228	B_229	44,3	0,0441	0,0737	0,0268	0,0145
B_766	B_802	36,6	0,0172	0,046	0,00592	0,0103
B_229	050ET066156	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_154	B_767	41,3	0,0194	0,052	0,0067	0,0117
B_767	B_264	28,2	0,0133	0,0356	0,00458	0,00798
B_264	B_768	34,2	0,016	0,043	0,00554	0,00965
B_264	050IP017900	3,31	0,00165	0,00417	0,000632	0,000935
B_768	B_214	29,2	0,0137	0,0368	0,00474	0,00826
B_214	B_216	29,8	0,014	0,0375	0,00483	0,00843
B_214	B_215	5,1	0,00487	0,00885	0,00308	0,00167
B_216	B_217	24,2	0,0114	0,0305	0,00392	0,00684
B_215	B_786	3,47	0,00331	0,00602	0,0021	0,00114
B_217	B_641	26,5	0,0124	0,0333	0,00429	0,00747
B_641	B_57	6,81	0,00679	0,0113	0,00412	0,00223
B_641	B_642	35,2	0,0165	0,0443	0,00571	0,00995
B_56	B_230	23,4	0,0224	0,0406	0,0142	0,00767
B_642	B_643	34,7	0,0163	0,0437	0,00562	0,0098
B_230	B_231	31,4	0,0597	0,0452	0,048	0,0115
B_637	B_787	30,8	0,0301	0,0431	0,0186	0,0101
B_643	B_644	37,1	0,0174	0,0467	0,00601	0,0105
B_231	B_232	28,8	0,0287	0,048	0,0174	0,00944
B_637	B_638	34,9	0,0341	0,0489	0,0211	0,0114
B_644	B_645	35,1	0,0165	0,0441	0,00568	0,0099
B_232	B_233	9,22	0,00919	0,0153	0,00558	0,00302
B_638	B_639	34,9	0,0341	0,0489	0,0211	0,0114
B_645	B_646	30,2	0,0142	0,0379	0,00488	0,00852
B_233	B_234	8,06	0,00803	0,0134	0,00487	0,00264
B_639	B_640	35,4	0,0346	0,0495	0,0214	0,0116
B_646	B_392	30,1	0,0141	0,0379	0,00487	0,0085
B_234	B_235	34,9	0,0348	0,0581	0,0211	0,0114
B_640	B_545	21,5	0,0211	0,0302	0,013	0,00705
B_391	B_392	3,47	0,00173	0,00437	0,000662	0,00098
B_235	050ET029183	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_235	B_236	19,4	0,0194	0,0323	0,0117	0,00636
B_545	B_546	11,9	0,0116	0,0167	0,00719	0,00389
B_391	B_265	29,5	0,0139	0,0372	0,00479	0,00834
B_236	B_237	13	0,013	0,0217	0,00789	0,00427
B_546	B_547	7,36	0,0072	0,0103	0,00445	0,00241
B_265	B_393	37,7	0,0177	0,0474	0,0061	0,0106
B_265	080IP017494	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_237	B_365	38,3	0,0382	0,0638	0,0232	0,0125
B_547	B_238	30,8	0,0301	0,0432	0,0186	0,0101
B_393	B_394	32,4	0,0152	0,0408	0,00525	0,00915
B_365	B_366	22,1	0,022	0,0368	0,0134	0,00723
B_238	080ET035260	1,23	0,000613	0,00155	0,000235	0,000347
B_238	B_239	36,9	0,0368	0,0614	0,0223	0,0121
B_394	B_770	39,7	0,0191	0,0538	0,00644	0,0112
B_366	B_367	31,3	0,0312	0,052	0,0189	0,0102
B_239	080IP017496	0,95	0,000929	0,00133	0,000574	0,000311
B_239	B_368	17,8	0,0177	0,0296	0,0108	0,00583
B_770	B_769	17,1	0,00917	0,0232	0,00278	0,00484
B_367	B_369	4,47	0,00445	0,00744	0,0027	0,00146
B_368	B_370	17	0,0169	0,0282	0,0103	0,00556
B_769	B_771	19,7	0,0105	0,0267	0,00319	0,00556
B_769	080ET068024	1,89	0,000942	0,00238	0,000361	0,000534
B_369	B_649	36	0,0359	0,0599	0,0218	0,0118
B_369	B_372	6,32	0,0063	0,0105	0,00382	0,00207
B_370	B_371	16,3	0,0162	0,0271	0,00984	0,00533
B_771	B_772	50,1	0,0269	0,068	0,00813	0,0142
B_649	B_650	28,1	0,028	0,0467	0,017	0,00919
B_649	050ET247124	1,12	0,0011	0,00157	0,000677	0,000367
B_372	B_373	25,1	0,025	0,0417	0,0152	0,00821
B_371	B_556	15,5	0,0151	0,0217	0,00935	0,00506
B_772	B_576	77,2	0,0384	0,0971	0,0147	0,0218
B_650	B_651	22,5	0,0224	0,0374	0,0136	0,00736
B_373	B_374	25,1	0,025	0,0417	0,0152	0,00821
B_556	B_557	30,7	0,03	0,043	0,0185	0,01
B_576	080IP016331	1,78	0,00174	0,00249	0,00108	0,000583
B_576	B_577	38	0,0189	0,0479	0,00725	0,0107
B_651	B_652	19,7	0,0197	0,0328	0,0119	0,00646
B_374	B_375	17,5	0,0174	0,0291	0,0106	0,00573
B_557	080ET035261	1,88	0,00184	0,00263	0,00114	0,000615
B_557	B_558	27,8	0,0272	0,039	0,0168	0,00911
B_577	B_151	26,9	0,0263	0,0377	0,0163	0,00882
B_577	080ET011852	2,21	0,0011	0,00278	0,000422	0,000624
B_652	B_377	17,9	0,0178	0,0298	0,0108	0,00586
B_375	B_376	24,2	0,0241	0,0402	0,0146	0,00791
B_558	B_381	14,9	0,0146	0,0209	0,009	0,00487

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_151	B_395	24,2	0,0237	0,0339	0,0146	0,00792
B_377	B_378	18,4	0,0184	0,0307	0,0112	0,00604
B_376	B_379	17,1	0,0171	0,0285	0,0104	0,0056
B_381	B_630	16,8	0,0165	0,0236	0,0102	0,00551
B_381	B_382	4,12	0,00403	0,00577	0,00249	0,00135
B_395	B_398	7	0,00685	0,00981	0,00423	0,00229
B_395	B_396	31,3	0,0306	0,0438	0,0189	0,0102
B_378	B_248	32,2	0,0321	0,0537	0,0195	0,0106
B_379	B_380	17	0,017	0,0283	0,0103	0,00558
B_630	B_631	32,7	0,032	0,0458	0,0198	0,0107
B_382	B_634	6,18	0,00605	0,00866	0,00374	0,00202
B_398	B_400	22,6	0,0221	0,0317	0,0137	0,00741
B_396	B_397	10,8	0,0106	0,0152	0,00654	0,00354
B_248	050ET059160	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_380	B_383	25,3	0,0252	0,0421	0,0153	0,00829
B_631	B_632	30	0,0294	0,0421	0,0182	0,00983
B_634	B_635	30,3	0,0297	0,0425	0,0184	0,00994
B_400	B_401	9,43	0,00922	0,0132	0,0057	0,00309
B_397	B_399	23,6	0,0231	0,039	0,0143	0,00773
B_383	B_249	45,4	0,0452	0,0756	0,0275	0,0149
B_632	B_633	31	0,0303	0,0434	0,0188	0,0102
B_635	B_636	29	0,0283	0,0406	0,0175	0,00949
B_401	B_793	9,77	0,00956	0,0137	0,00591	0,0032
B_399	B_402	14,9	0,0133	0,0202	0,00899	0,00487
B_249	050ET051364	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_633	080ET247056	2,47	0,00242	0,00346	0,00149	0,000809
B_636	B_718	17,8	0,017	0,0308	0,0108	0,00582
B_636	080ET073364	1,45	0,00142	0,00203	0,000877	0,000475
B_402	B_403	15,3	0,0136	0,0207	0,00923	0,005
B_718	B_719	19,9	0,019	0,0345	0,012	0,00652
B_92	B_408	19	0,0186	0,0266	0,0115	0,00622
B_403	B_404	30,9	0,0275	0,0419	0,0187	0,0101
B_719	B_720	40,6	0,0387	0,0704	0,0246	0,0133
B_408	B_409	27,7	0,0271	0,0387	0,0167	0,00905
B_404	B_405	12,5	0,0112	0,017	0,00758	0,0041
B_720	B_721	20,5	0,0196	0,0355	0,0124	0,00671
B_409	B_410	21	0,0206	0,0294	0,0127	0,00688
B_405	B_406	27,9	0,0248	0,0378	0,0168	0,00912
B_721	B_722	20,5	0,0196	0,0356	0,0124	0,00672
B_410	B_411	17,5	0,0171	0,0245	0,0106	0,00572
B_406	B_407	31,4	0,028	0,0426	0,019	0,0103
B_722	080ET999998	2,64	0,00252	0,00458	0,0016	0,000864
B_411	B_412	26,9	0,0263	0,0377	0,0163	0,00882
B_407	B_539	30	0,0268	0,0407	0,0182	0,00983
B_412	B_413	29,7	0,0291	0,0416	0,018	0,00972

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_539	B_627	26,3	0,0118	0,0344	0,00425	0,00742
B_539	080ET060941	1,99	0,000992	0,0025	0,00038	0,000562
B_413	B_665	38,6	0,0377	0,0541	0,0233	0,0126
B_413	B_578	21,4	0,0209	0,0299	0,0129	0,007
B_627	B_795	29,1	0,0131	0,0382	0,00472	0,00823
B_627	B_628	64,2	0,0613	0,111	0,0388	0,021
B_665	B_666	29,7	0,029	0,0416	0,0179	0,00972
B_578	B_579	19,4	0,019	0,0272	0,0117	0,00636
B_628	B_420	32,3	0,0308	0,056	0,0195	0,0106
B_666	B_723	34	0,0332	0,0476	0,0205	0,0111
B_666	080ET041379	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_579	080IP017862	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_579	B_414	18,2	0,0179	0,0256	0,011	0,00597
B_104	B_422	34,7	0,0156	0,0455	0,00562	0,00979
B_420	B_670	35,5	0,0347	0,0497	0,0214	0,0116
B_420	B_421	17,5	0,0174	0,0291	0,0106	0,00573
B_414	B_418	40,3	0,0395	0,0666	0,0243	0,0132
B_414	B_415	16,2	0,0158	0,0226	0,00977	0,00529
B_422	B_423	9,61	0,0094	0,0135	0,00581	0,00315
B_670	B_671	23,6	0,0231	0,0331	0,0143	0,00773
B_421	B_105	4,12	0,00411	0,00686	0,00249	0,00135
B_418	B_419	16	0,0157	0,0224	0,00968	0,00524
B_415	B_416	24,6	0,0241	0,0345	0,0149	0,00805
B_423	B_490	21,2	0,0207	0,0297	0,0128	0,00694
B_423	B_426	2	0,00196	0,0028	0,00121	0,000655
B_423	B_424	2,83	0,00277	0,00396	0,00171	0,000926
B_671	B_250	9,22	0,00902	0,0129	0,00558	0,00302
B_419	B_552	28,7	0,028	0,0401	0,0173	0,00938
B_416	B_417	16,6	0,0163	0,0233	0,0101	0,00545
B_490	B_491	23,3	0,0228	0,0327	0,0141	0,00763
B_426	B_427	29,1	0,0285	0,0408	0,0176	0,00954
B_424	B_425	5,39	0,00527	0,00755	0,00326	0,00176
B_250	B_672	8,6	0,00841	0,012	0,0052	0,00282
B_250	080ET011853	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_363	B_796	27,2	0,0271	0,0453	0,0165	0,00891
B_552	B_553	31,1	0,0304	0,0435	0,0188	0,0102
B_417	080ET060910	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_491	080ET048499	1,73	0,00169	0,00242	0,00105	0,000566
B_491	B_492	19,9	0,0194	0,0278	0,012	0,0065
B_427	B_430	33,1	0,0324	0,0464	0,02	0,0108
B_425	B_101	29,7	0,029	0,0416	0,0179	0,00972
B_672	B_673	18,4	0,018	0,0257	0,0111	0,00602
B_363	B_364	28,2	0,0281	0,0469	0,017	0,00922
B_553	080ET041158	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_553	B_559	39,5	0,0386	0,0553	0,0239	0,0129

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_492	B_569	39,3	0,0385	0,0551	0,0238	0,0129
B_430	B_431	30	0,0294	0,0421	0,0182	0,00983
B_673	B_801	39,8	0,039	0,0558	0,0241	0,013
B_364	B_266	17,8	0,0177	0,0296	0,0108	0,00583
B_569	B_570	47,4	0,0464	0,0664	0,0287	0,0155
B_431	B_566	30,5	0,0278	0,0398	0,0185	0,00999
B_284	B_794	12,6	0,0123	0,0177	0,00762	0,00412
B_266	B_267	18,8	0,0187	0,0313	0,0114	0,00615
B_570	B_571	21,6	0,0212	0,0303	0,0131	0,00708
B_566	080ET048599	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_566	B_567	35	0,0319	0,0456	0,0212	0,0115
B_284	B_580	17,2	0,0168	0,0241	0,0104	0,00563
B_284	B_285	5,1	0,00499	0,00714	0,00308	0,00167
B_142	B_428	33,1	0,0324	0,0464	0,02	0,0108
B_267	B_268	37,2	0,037	0,0619	0,0225	0,0122
B_571	080ET240832	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_571	B_572	23,3	0,0228	0,0327	0,0141	0,00763
B_580	080IP016278	0,81	0,000792	0,00113	0,00049	0,000265
B_580	B_286	6,71	0,00656	0,0094	0,00406	0,0022
B_285	B_537	26,4	0,0258	0,037	0,016	0,00865
B_428	B_429	19,4	0,0194	0,0323	0,0117	0,00636
B_268	B_269	38,9	0,0388	0,0648	0,0236	0,0128
B_572	B_573	26,1	0,0255	0,0365	0,0158	0,00854
B_286	B_287	23	0,0225	0,0322	0,0139	0,00754
B_537	B_538	33,6	0,0329	0,0471	0,0203	0,011
B_429	B_320	18,8	0,0187	0,0313	0,0114	0,00615
B_269	B_270	33,9	0,0338	0,0565	0,0205	0,0111
B_573	B_543	22,4	0,0219	0,0313	0,0135	0,00732
B_287	B_554	23,8	0,0233	0,0334	0,0144	0,00781
B_287	B_290	2,83	0,00277	0,00396	0,00171	0,000926
B_538	080ET054897	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_538	B_288	26,9	0,0263	0,0377	0,0163	0,00882
B_320	B_797	23,3	0,0228	0,0326	0,0141	0,00762
B_320	B_321	30,2	0,0296	0,0423	0,0183	0,0099
B_270	B_271	35,6	0,0355	0,0593	0,0215	0,0117
B_543	B_544	40,8	0,04	0,0572	0,0247	0,0134
B_554	080ET034602	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_554	B_555	8,06	0,00788	0,0113	0,00487	0,00264
B_290	B_291	26,9	0,0263	0,0377	0,0163	0,00882
B_288	B_289	3	0,00293	0,0042	0,00181	0,000982
B_321	B_322	17,9	0,0175	0,0251	0,0108	0,00586
B_271	B_273	36,1	0,0353	0,0505	0,0218	0,0118
B_271	B_272	4,47	0,00445	0,00744	0,0027	0,00146
B_544	080ET246454	5,2	0,00509	0,00728	0,00314	0,0017
B_544	B_531	29,5	0,0289	0,0414	0,0179	0,00967

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_555	B_297	16,6	0,0163	0,0233	0,0101	0,00545
B_291	B_292	35	0,0342	0,049	0,0212	0,0115
B_289	B_294	17,9	0,0175	0,0251	0,0108	0,00586
B_110	B_604	29,8	0,0292	0,0418	0,018	0,00976
B_322	080ET043388	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_273	B_274	30,4	0,0297	0,0426	0,0184	0,00995
B_272	B_275	34,2	0,0334	0,0479	0,0207	0,0112
B_531	B_792	12,8	0,0128	0,0213	0,00775	0,0042
B_531	B_540	6,03	0,0059	0,00845	0,00365	0,00197
B_297	B_298	19,2	0,0188	0,027	0,0116	0,0063
B_292	B_293	22,5	0,022	0,0315	0,0136	0,00736
B_294	080IP017363	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_604	B_323	21	0,0206	0,0294	0,0127	0,00688
B_274	B_240	31	0,0303	0,0435	0,0188	0,0102
B_274	B_278	3,47	0,00339	0,00486	0,0021	0,00114
B_275	B_276	35,5	0,0347	0,0497	0,0214	0,0116
B_540	B_541	34	0,026	0,0471	0,0133	0,0106
B_298	080ET244990	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_293	B_295	32,2	0,0315	0,0452	0,0195	0,0106
B_323	B_324	25,1	0,0245	0,0351	0,0152	0,0082
B_240	B_279	27,5	0,0269	0,0385	0,0166	0,00899
B_240	080IP017448	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_278	B_758	29,1	0,0285	0,0408	0,0176	0,00953
B_276	B_253	34,2	0,0334	0,0479	0,0207	0,0112
B_89	B_532	27,7	0,0276	0,0462	0,0168	0,00908
B_541	B_542	14,5	0,0111	0,02	0,00568	0,00449
B_295	B_296	33,1	0,0324	0,0464	0,02	0,0108
B_324	B_325	32,3	0,0316	0,0452	0,0195	0,0106
B_279	B_318	27	0,0264	0,0379	0,0163	0,00885
B_279	B_280	3,16	0,00309	0,00443	0,00191	0,00103
B_758	B_759	29,5	0,0289	0,0413	0,0178	0,00966
B_253	B_277	5,83	0,0057	0,00817	0,00353	0,00191
B_253	080ET046506	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_532	B_530	29,8	0,0297	0,0495	0,018	0,00974
B_542	B_791	12,8	0,0125	0,0179	0,00773	0,00419
B_542	B_582	23	0,0176	0,0319	0,00903	0,00715
B_296	080ET090104	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_325	B_326	29,3	0,0286	0,041	0,0177	0,00958
B_318	080ET046505	1,96	0,00192	0,00275	0,00119	0,000642
B_318	B_319	34	0,0333	0,0476	0,0206	0,0111
B_280	B_281	29,4	0,0288	0,0412	0,0178	0,00963
B_759	B_757	28,9	0,0282	0,0404	0,0174	0,00944
B_277	B_754	10,8	0,0106	0,0152	0,00654	0,00354
B_530	B_529	38,8	0,0386	0,0645	0,0234	0,0127
B_582	B_583	18,4	0,0141	0,0254	0,00721	0,0057

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_326	B_327	28,3	0,0277	0,0396	0,0171	0,00926
B_319	B_709	35,9	0,0351	0,0503	0,0217	0,0118
B_281	B_282	30,1	0,0294	0,0421	0,0182	0,00985
B_757	B_753	30,3	0,0277	0,0396	0,0183	0,00993
B_754	B_755	31	0,0303	0,0435	0,0188	0,0102
B_529	B_526	39,7	0,0388	0,0556	0,024	0,013
B_86	B_613	11,7	0,0116	0,0194	0,00705	0,00382
B_583	B_603	21,8	0,0167	0,0302	0,00856	0,00677
B_583	080ET008639	1,27	0,00124	0,00178	0,000768	0,000416
B_327	B_328	29,7	0,0291	0,0416	0,018	0,00973
B_709	B_710	10,2	0,00998	0,0143	0,00617	0,00334
B_282	B_283	32,6	0,0319	0,0456	0,0197	0,0107
B_753	080ET240775	0,86	0,000841	0,0012	0,00052	0,000282
B_755	B_756	24,2	0,0237	0,0339	0,0146	0,00792
B_526	B_527	34,4	0,0337	0,0483	0,0208	0,0113
B_613	B_614	30,5	0,0304	0,0508	0,0184	0,00998
B_603	B_790	16,2	0,0159	0,0227	0,00981	0,00531
B_603	B_574	33,6	0,0258	0,0465	0,0132	0,0104
B_328	B_329	30,4	0,0303	0,0506	0,0184	0,00996
B_710	B_708	21,2	0,0207	0,0297	0,0128	0,00694
B_283	080ET244011	1,64	0,0016	0,0023	0,000992	0,000537
B_527	B_528	32,7	0,032	0,0459	0,0198	0,0107
B_614	B_615	35,4	0,0352	0,0589	0,0214	0,0116
B_574	B_575	36,8	0,0282	0,0509	0,0144	0,0114
B_329	B_330	32	0,0318	0,0532	0,0193	0,0105
B_708	B_711	26,5	0,0259	0,0371	0,016	0,00867
B_708	080ET091459	2,39	0,00234	0,00335	0,00145	0,000782
B_528	080ET245853	2,98	0,00148	0,00375	0,000569	0,000842
B_615	B_612	33,3	0,0332	0,0554	0,0201	0,0109
B_82	B_605	34	0,0333	0,0477	0,0206	0,0111
B_575	080IP016303	2,43	0,00238	0,0034	0,00147	0,000795
B_575	B_533	20,6	0,0158	0,0285	0,00809	0,0064
B_330	B_251	12,5	0,0125	0,0209	0,00758	0,0041
B_711	B_712	32,4	0,0317	0,0454	0,0196	0,0106
B_612	080ET065023	2,61	0,0013	0,00329	0,000498	0,000737
B_605	B_254	38,6	0,0378	0,0541	0,0234	0,0126
B_533	B_616	12,1	0,0118	0,0169	0,00731	0,00395
B_533	B_534	20,6	0,0158	0,0286	0,0081	0,00641
B_251	B_331	17,5	0,0174	0,0291	0,0106	0,00572
B_251	080ET060344	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_254	080ET240831	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_616	B_617	18,7	0,0183	0,0262	0,0113	0,00611
B_534	B_76	2,14	0,00209	0,003	0,00129	0,000701
B_534	B_535	41,1	0,0315	0,0569	0,0161	0,0127
B_331	B_332	30,1	0,03	0,0501	0,0182	0,00985

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_617	B_74	16,5	0,0161	0,0231	0,00995	0,00539
B_617	080ET090145	2,71	0,00135	0,00341	0,000517	0,000765
B_535	B_515	41	0,0314	0,0567	0,0161	0,0127
B_332	B_333	13,3	0,013	0,0187	0,00807	0,00437
B_515	B_516	26,2	0,02	0,0362	0,0103	0,00812
B_333	B_336	18,2	0,0179	0,0256	0,011	0,00597
B_333	B_335	10,4	0,0102	0,0146	0,00631	0,00342
B_333	B_334	7,07	0,00692	0,0099	0,00428	0,00231
B_618	B_789	33,2	0,0325	0,0465	0,0201	0,0109
B_516	B_788	12	0,0119	0,0199	0,00723	0,00392
B_516	080ET241272	1,51	0,00148	0,00212	0,000913	0,000494
B_516	B_512	14,2	0,00993	0,0183	0,00557	0,0044
B_336	B_536	32,4	0,0323	0,0539	0,0196	0,0106
B_334	B_337	29,1	0,029	0,0485	0,0176	0,00953
B_618	B_611	29,8	0,0291	0,0417	0,018	0,00975
B_512	B_72	5,73	0,0056	0,00803	0,00347	0,00188
B_512	B_513	24,8	0,0124	0,0312	0,00474	0,00701
B_536	080ET244014	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_536	B_299	35,7	0,0356	0,0594	0,0216	0,0117
B_624	080ET048600	4,35	0,00426	0,00609	0,00263	0,00142
B_342	B_343	36,8	0,0367	0,0613	0,0223	0,012
B_521	B_522	35,6	0,0355	0,0593	0,0216	0,0117
B_663	B_664	17,2	0,0171	0,0286	0,0104	0,00563
B_343	B_626	29,5	0,0294	0,0492	0,0179	0,00967
B_522	B_523	25,4	0,0253	0,0422	0,0153	0,0083
B_664	B_661	19,6	0,0195	0,0326	0,0118	0,00641
B_626	B_496	25,5	0,0254	0,0424	0,0154	0,00833
B_626	080ET065599	1,45	0,00142	0,00203	0,000877	0,000475
B_523	B_524	12	0,012	0,02	0,00728	0,00394
B_661	B_302	5,91	0,00578	0,00828	0,00357	0,00193
B_496	B_152	26,2	0,0262	0,0437	0,0159	0,00859
B_496	B_497	19	0,0186	0,0266	0,0115	0,00621
B_524	B_525	19,5	0,0195	0,0325	0,0118	0,00639
B_302	B_303	5,83	0,00581	0,0097	0,00353	0,00191
B_152	B_737	8,37	0,00834	0,0139	0,00506	0,00274
B_497	B_498	26,7	0,0261	0,0374	0,0161	0,00874
B_525	B_510	17,8	0,0178	0,0297	0,0108	0,00584
B_525	080ET046482	0,58	0,000289	0,00073	0,000111	0,000164
B_303	B_304	30,5	0,0304	0,0507	0,0184	0,00998
B_347	B_493	30,3	0,0296	0,0425	0,0183	0,00992
B_350	B_354	7	0,00698	0,0117	0,00423	0,00229
B_350	B_353	27,9	0,0278	0,0464	0,0168	0,00912
B_622	B_493	30,8	0,0301	0,0431	0,0186	0,0101
B_493	080ET090087	1,37	0,000683	0,00172	0,000261	0,000387
B_354	B_360	7,21	0,00719	0,012	0,00436	0,00236

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_353	B_359	31,1	0,031	0,0518	0,0188	0,0102
B_621	B_622	18,6	0,0182	0,026	0,0112	0,00608
B_359	B_362	32,3	0,0322	0,0537	0,0195	0,0106
B_351	B_621	24,8	0,0242	0,0347	0,015	0,00811
B_362	080ET068049	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_620	B_351	32,8	0,0321	0,046	0,0199	0,0108
B_351	B_352	21,4	0,0107	0,0269	0,00408	0,00604
B_358	B_620	15,8	0,0154	0,0221	0,00954	0,00516
B_352	B_118	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_352	B_357	17	0,0166	0,0238	0,0103	0,00556
B_352	B_355	11,4	0,0112	0,016	0,00689	0,00373
B_358	B_122	33,6	0,0329	0,0471	0,0203	0,011
B_357	B_252	16	0,0157	0,0225	0,00969	0,00525
B_355	B_356	10,4	0,0102	0,0146	0,00631	0,00342
B_310	B_609	13,9	0,0124	0,0189	0,00841	0,00455
B_310	080ET246024	2,78	0,00139	0,0035	0,00053	0,000785
B_686	080ET248459	2,51	0,00246	0,00352	0,00152	0,000822
B_686	B_549	22,4	0,0219	0,0314	0,0136	0,00734
B_701	B_702	36,2	0,0355	0,0508	0,0219	0,0119
B_609	B_607	6,18	0,00551	0,00838	0,00374	0,00202
B_549	B_678	31,5	0,0309	0,0442	0,0191	0,0103
B_549	B_133	4,75	0,00465	0,00665	0,00287	0,00155
B_702	080ET248571	2,61	0,00255	0,00366	0,00158	0,000854
B_702	B_311	16,6	0,0162	0,0232	0,01	0,00542
B_607	B_760	23	0,0183	0,0339	0,00976	0,00927
B_607	B_608	16,7	0,0164	0,0234	0,0101	0,00547
B_678	B_679	19,6	0,0192	0,0275	0,0119	0,00643
B_311	B_312	17,9	0,0175	0,0251	0,0108	0,00586
B_311	B_255	8,94	0,00874	0,0125	0,00541	0,00293
B_760	B_761	30,9	0,0247	0,0457	0,0131	0,0125
B_608	B_647	34,9	0,0341	0,0489	0,0211	0,0114
B_679	B_680	14,3	0,014	0,0201	0,00866	0,00469
B_312	B_606	6,75	0,0066	0,00946	0,00408	0,00221
B_255	B_124	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_761	B_762	36,1	0,0288	0,0533	0,0153	0,0146
B_647	B_126	1,62	0,00158	0,00227	0,00098	0,00053
B_587	B_588	22,9	0,0224	0,0321	0,0139	0,00751
B_684	B_653	33,7	0,033	0,0472	0,0204	0,011
B_707	B_148	0,99	0,000968	0,00139	0,000599	0,000324
B_707	B_313	0,02	9,78E-06	1,40E-05	6,05E-06	3,27E-06
B_588	B_589	17,8	0,0174	0,025	0,0108	0,00583
B_653	B_654	35,9	0,0351	0,0503	0,0217	0,0118
B_313	B_314	15,7	0,0153	0,0219	0,00946	0,00512
B_589	B_590	37,1	0,0362	0,0519	0,0224	0,0121
B_654	B_655	33,7	0,033	0,0472	0,0204	0,011

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_314	B_667	35,8	0,035	0,0501	0,0216	0,0117
B_590	B_591	37,1	0,0363	0,052	0,0224	0,0121
B_655	B_656	27,7	0,0271	0,0387	0,0167	0,00905
B_667	B_137	4,9	0,00479	0,00686	0,00296	0,0016
B_667	B_668	40,8	0,0399	0,0572	0,0247	0,0134
B_591	B_592	34,9	0,0342	0,0489	0,0211	0,0114
B_656	B_139	3,43	0,00336	0,0048	0,00207	0,00112
B_656	B_657	10,4	0,0102	0,0146	0,00631	0,00342
B_668	B_550	38	0,0372	0,0532	0,023	0,0124
B_592	B_593	24,2	0,0237	0,034	0,0147	0,00793
B_657	B_658	34	0,0332	0,0476	0,0205	0,0111
B_550	B_551	25,1	0,0245	0,0351	0,0152	0,00821
B_593	080ET246823	2,46	0,00241	0,00345	0,00149	0,000805
B_669	B_601	32,7	0,032	0,0458	0,0198	0,0107
B_601	B_602	38,1	0,0372	0,0533	0,023	0,0125
B_337	B_338	21,8	0,0218	0,0364	0,0132	0,00715
B_611	B_610	29	0,0283	0,0406	0,0175	0,00948
B_71	B_517	29,7	0,0296	0,0495	0,018	0,00973
B_513	B_514	14	0,007	0,0177	0,00268	0,00397
B_299	B_300	29	0,0289	0,0483	0,0175	0,00949
B_338	B_339	19,2	0,0192	0,032	0,0116	0,0063
B_610	B_619	30,7	0,03	0,043	0,0186	0,0101
B_610	080ET031259	2,4	0,00235	0,00336	0,00145	0,000786
B_517	B_518	31,3	0,0312	0,0521	0,0189	0,0102
B_300	B_301	23	0,0229	0,0383	0,0139	0,00754
B_339	B_340	30,9	0,0308	0,0514	0,0187	0,0101
B_518	B_519	30,3	0,0302	0,0505	0,0183	0,00992
B_301	B_625	15,2	0,0152	0,0253	0,0092	0,00498
B_340	B_341	36,4	0,0363	0,0606	0,022	0,0119
B_519	B_520	26,2	0,0261	0,0436	0,0158	0,00857
B_625	B_662	17,2	0,0172	0,0286	0,0104	0,00563
B_625	B_624	16	0,0156	0,0224	0,00966	0,00523
B_341	B_342	25,7	0,0256	0,0428	0,0155	0,00842
B_520	B_521	15,6	0,0155	0,0259	0,00941	0,00509
B_662	B_663	30,6	0,0305	0,051	0,0185	0,01
B_737	B_344	18,7	0,0186	0,0311	0,0113	0,00612
B_498	B_499	22,7	0,0222	0,0318	0,0137	0,00743
B_510	B_511	19,3	0,0192	0,0321	0,0117	0,00631
B_304	B_305	36,1	0,036	0,0601	0,0218	0,0118
B_344	B_623	34,3	0,0342	0,0571	0,0207	0,0112
B_344	B_345	27,1	0,0265	0,0379	0,0164	0,00886
B_499	B_500	15,8	0,0155	0,0221	0,00955	0,00517
B_511	B_508	18,5	0,0184	0,0308	0,0112	0,00605
B_305	080ET089903	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_623	B_348	28,8	0,0287	0,0479	0,0174	0,00943

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_623	080IP017517	3,07	0,003	0,0043	0,00186	0,001
B_345	B_346	28,1	0,0275	0,0393	0,017	0,00919
B_500	B_501	28,3	0,0276	0,0396	0,0171	0,00925
B_508	B_509	37,7	0,0376	0,0627	0,0228	0,0123
B_348	B_349	32,3	0,0322	0,0537	0,0195	0,0106
B_346	B_347	16,3	0,0159	0,0228	0,00984	0,00533
B_501	B_502	15,8	0,0154	0,0221	0,00952	0,00516
B_501	080ET240579	2,29	0,00224	0,00321	0,00138	0,00075
B_509	080IP017477	1,06	0,00104	0,00148	0,000641	0,000347
B_349	B_350	30,1	0,03	0,0501	0,0182	0,00985
B_252	B_132	31	0,0303	0,0435	0,0188	0,0102
B_252	080ET090344	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_356	B_703	10,2	0,01	0,0143	0,00619	0,00335
B_356	B_361	11,2	0,0109	0,0157	0,00676	0,00366
B_306	B_799	34	0,0333	0,0476	0,0206	0,0111
B_703	B_704	0,16	0,000157	0,000224	9,68E-05	5,24E-05
B_361	B_120	3,89	0,00194	0,0049	0,000742	0,0011
B_306	B_307	34,1	0,0333	0,0477	0,0206	0,0111
B_315	B_800	34,1	0,0334	0,0478	0,0206	0,0112
B_704	B_705	0,09	8,80E-05	0,000126	5,44E-05	2,95E-05
B_307	B_308	34,8	0,0341	0,0488	0,0211	0,0114
B_315	B_317	28	0,0139	0,0352	0,00534	0,0079
B_315	B_316	30	0,0293	0,042	0,0181	0,00981
B_705	B_121	8,31	0,00813	0,0116	0,00503	0,00272
B_308	B_309	34,1	0,0333	0,0477	0,0206	0,0112
B_316	B_685	30	0,0293	0,042	0,0181	0,00981
B_309	B_310	32,1	0,0314	0,045	0,0194	0,0105
B_685	B_686	19,4	0,0189	0,0271	0,0117	0,00634
B_701	B_798	17,8	0,0174	0,0249	0,0108	0,00582
B_647	B_648	36,4	0,0356	0,051	0,022	0,0119
B_680	B_681	34,7	0,034	0,0486	0,021	0,0114
B_606	B_548	15,6	0,0153	0,0219	0,00944	0,00511
B_606	B_134	4,19	0,0041	0,00587	0,00253	0,00137
B_762	B_763	33,1	0,0264	0,0488	0,0141	0,0134
B_648	B_584	16,1	0,0158	0,0226	0,00975	0,00528
B_681	B_682	34,5	0,0338	0,0484	0,0209	0,0113
B_548	B_256	11,7	0,0114	0,0164	0,00708	0,00383
B_548	080ET244057	1,55	0,00152	0,00217	0,000937	0,000507
B_763	B_764	44,7	0,0357	0,066	0,019	0,018
B_584	B_585	18,8	0,0184	0,0263	0,0114	0,00614
B_682	B_257	23,2	0,0227	0,0325	0,014	0,0076
B_256	B_700	14,1	0,0138	0,0198	0,00855	0,00463
B_256	080ET241916	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_764	B_153	7,77	0,0076	0,0109	0,0047	0,00254
B_764	B_765	24	0,0192	0,0354	0,0102	0,00969

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_585	B_586	19,4	0,019	0,0272	0,0117	0,00635
B_257	B_683	25,8	0,0252	0,0362	0,0156	0,00845
B_257	080ET241917	1,44	0,000718	0,00181	0,000275	0,000407
B_700	B_706	6,7	0,00655	0,00939	0,00405	0,00219
B_700	B_146	2,15	0,0021	0,00301	0,0013	0,000704
B_586	B_587	22,1	0,0216	0,031	0,0134	0,00723
B_683	B_684	19,4	0,019	0,0272	0,0117	0,00636
B_706	B_707	0,17	0,000166	0,000238	0,000103	5,56E-05
B_593	B_594	28,3	0,0277	0,0396	0,0171	0,00926
B_658	B_659	33,4	0,0327	0,0468	0,0202	0,0109
B_594	B_595	33,6	0,0328	0,047	0,0203	0,011
B_659	B_660	28,6	0,028	0,0401	0,0173	0,00938
B_595	B_596	33,2	0,0325	0,0465	0,0201	0,0109
B_660	B_581	35,2	0,0345	0,0494	0,0213	0,0115
B_596	B_597	32	0,0313	0,0449	0,0194	0,0105
B_581	B_674	11	0,0108	0,0154	0,00666	0,00361
B_581	B_140	2,38	0,00233	0,00333	0,00144	0,000779
B_597	B_598	32,4	0,0317	0,0454	0,0196	0,0106
B_674	B_143	2,51	0,00246	0,00352	0,00152	0,000822
B_674	B_675	26,3	0,0257	0,0369	0,0159	0,00862
B_598	B_144	3,85	0,00377	0,00539	0,00233	0,00126
B_598	B_599	35,8	0,035	0,0501	0,0216	0,0117
B_675	B_676	35,2	0,0345	0,0494	0,0213	0,0115
B_599	B_600	38	0,0372	0,0533	0,023	0,0124
B_676	B_258	36,2	0,0354	0,0507	0,0219	0,0119
B_600	B_629	31,4	0,0307	0,044	0,019	0,0103
B_258	B_677	29,1	0,0285	0,0408	0,0176	0,00954
B_258	080ET241918	1,27	0,000633	0,0016	0,000242	0,000359
B_629	B_128	0,97	0,000949	0,00136	0,000587	0,000318
B_629	B_669	23,2	0,0227	0,0324	0,014	0,00758
B_669	080ET246824	1,72	0,00168	0,00241	0,00104	0,000563

Chaves da rede A

Barra1	Barra2	chave	tipo	iadm_a	estado
COT 01.MT	B_773	050DJCOT021	Disjuntor	0	Fechada
B_3	B_774	050CF014284	Indefinida	400	Fechada
B_6	B_775	050CF016992	Indefinida	400	Fechada
B_8	B_776	050CF241702	Indefinida	400	Fechada
B_12	B_777	050CF016966	Indefinida	400	Fechada
B_24	B_779	050BF240982	Base Fusível	100	Fechada
B_26	B_780	050BF241701	Base Fusível	100	Fechada
B_15	B_778	050BF240983	Base Fusível	100	Fechada

Anexo B. Dados específicos da rede A

B_36	B_781	050CF016961	Indefinida	400	Fechada
B_39	B_782	050BF241700	Base Fusível	100	Fechada
B_43	B_783	050CF017028	Indefinida	400	Fechada
B_47	B_784	050CF043022	Indefinida	400	Fechada
B_48	B_785	050CF043024	Indefinida	400	Fechada
B_154	B_802	050RA041189	Indefinida	400	Fechada
B_56	B_786	050BF240980	Base Fusível	100	Fechada
B_57	B_787	050BF042268	Base Fusível	100	Fechada
B_92	B_793	080BF240529	Base Fusível	100	Fechada
B_104	B_795	080FF041246	Base Fusível	100	Fechada
B_105	B_796	080BF041247	Base Fusível	100	Fechada
B_101	B_794	080BF240977	Base Fusível	100	Fechada
B_142	B_801	080CF043291	Indefinida	400	Fechada
B_110	B_797	080BF244254	Base Fusível	100	Fechada
B_89	B_792	080BF240528	Base Fusível	100	Fechada
B_86	B_791	080BF041245	Base Fusível	100	Fechada
B_82	B_790	080BF244253	Base Fusível	100	Fechada
B_74	B_789	080BF240527	Base Fusível	100	Fechada
B_71	B_788	080BF240526	Base Fusível	100	Fechada
B_122	B_799	080BF244055	Base Fusível	100	Fechada
B_132	B_800	080CF043023	Indefinida	400	Fechada
B_121	B_798	080BF244096	Base Fusível	100	Fechada

Cargas da rede A

Barra	Carga	Classe	Fases	Energia_MWh	Modelo
050ET017397	050ET017397	Equivalente	BN	9,52	Icte
050IP017762	050IP017762	Equivalente	AN	0,109	Icte
050ET241336	050ET241336	Equivalente	CN	0,836	Icte
050ET014738	050ET014738	Equivalente	BN	17,6	Icte
050ET028734	050ET028734	Equivalente	ABCN	3,64	Icte
050ET043049	050ET043049	Equivalente	BN	10,8	Icte
050ET011713	050ET011713	Equivalente	BN	4,29	Icte
050ET066282	050ET066282	Equivalente	CN	4,9	Icte
050ET019068	050ET019068	Equivalente	ABN	6,62	Icte
050ET036395	050ET036395	Equivalente	BN	8,02	Icte
050ET014737	050ET014737	Equivalente	BN	18	Icte
050ET244231	050ET244231	Equivalente	BN	4,55	Icte
050ET009162	050ET009162	Equivalente	ABN	1,34	Icte
050ET400243	050ET400243	Equivalente	ABC	8,88	Icte
050ET091295	050ET091295	Equivalente	BN	9,74	Icte
050ET028730	050ET028730	Equivalente	AN	3,34	Icte
050ET241118	050ET241118	Equivalente	ABN	5,65	Icte
050ET032265	050ET032265	Equivalente	ABN	3,62	Icte

Anexo B. Dados específicos da rede A

050ET014705	050ET014705	Equivalente	ABN	16,3	Icte
050ET089427	050ET089427	Equivalente	ABN	17,8	Icte
050ET050332	050ET050332	Equivalente	CN	7,13	Icte
050ET066191	050ET066191	Equivalente	ABCN	4,14	Icte
B_45	2MTE000008947	A4	ABC	53,7	Icte
050ET066156	050ET066156	Equivalente	ABN	3,73	Icte
050ET051364	050ET051364	Equivalente	BN	4,05	Icte
050ET247124	050ET247124	Equivalente	BN	1	Icte
050ET029184	050ET029184	Equivalente	BCN	6,16	Icte
050ET029183	050ET029183	Equivalente	BN	4,64	Icte
050ET059160	050ET059160	Equivalente	BN	3,5	Icte
080IP017494	080IP017494	Equivalente	BN	0,417	Icte
080ET068024	080ET068024	Equivalente	AN	8,49	Icte
080ET244011	080ET244011	Equivalente	CN	8,31	Icte
080ET046505	080ET046505	Equivalente	CN	2,21	Icte
080ET091459	080ET091459	Equivalente	CN	16,4	Icte
080IP017477	080IP017477	Equivalente	CN	1,2	Icte
080ET046482	080ET046482	Equivalente	BCN	1,72	Icte
080ET073364	080ET073364	Equivalente	ABN	11,8	Icte
080ET035260	080ET035260	Equivalente	ABN	8,59	Icte
080IP017496	080IP017496	Equivalente	BN	1,47	Icte
080ET035261	080ET035261	Equivalente	ABN	4,54	Icte
080ET031259	080ET031259	Equivalente	BN	30,4	Icte
B_72	2MTE200001700	A4	ABC	44,9	Icte
080ET241272	080ET241272	Equivalente	CAN	21,9	Icte
B_76	2BTE043743285	A4	ABC	0,292	Icte
B_76	2MTE000012895	A4	ABC	106	Icte
B_76	2BTE112462162	A4	ABC	0,602	Icte
B_76	2BTE043743293	A4	ABC	0,238	Icte
080ET240831	080ET240831	Equivalente	BN	11,9	Icte
080IP016303	080IP016303	Equivalente	BN	3,35	Icte
080ET041379	080ET041379	Equivalente	BN	14,5	Icte
080ET245853	080ET245853	Equivalente	AN	21,8	Icte
080ET065023	080ET065023	Equivalente	AN	11,4	Icte
080ET008639	080ET008639	Equivalente	ABN	3,14	Icte
080ET060910	080ET060910	Equivalente	AN	12,3	Icte
080IP017862	080IP017862	Equivalente	AN	3,09	Icte
080ET041158	080ET041158	Equivalente	AN	19,9	Icte
080IP016331	080IP016331	Equivalente	CN	2,69	Icte
080ET090104	080ET090104	Equivalente	BN	9,16	Icte
080ET011852	080ET011852	Equivalente	CAN	29,5	Icte
080ET246454	080ET246454	Equivalente	ABC	0,41	Icte
080IP017363	080IP017363	Equivalente	BN	2,55	Icte
080ET048599	080ET048599	Equivalente	ABN	12,5	Icte
080ET244990	080ET244990	Equivalente	BN	23,5	Icte

Anexo B. Dados específicos da rede A

080ET054897	080ET054897	Equivalente	ABN	12,3	Icte
080ET034602	080ET034602	Equivalente	AN	8,71	Icte
080ET240832	080ET240832	Equivalente	CN	21	Icte
080IP016278	080IP016278	Equivalente	AN	1,85	Icte
080ET060941	080ET060941	Equivalente	CN	4,28	Icte
080ET048499	080ET048499	Equivalente	CN	3,75	Icte
080ET046506	080ET046506	Equivalente	CN	4,84	Icte
080ET068049	080ET068049	Equivalente	BN	19,6	Icte
080ET240775	080ET240775	Equivalente	CN	23,2	Icte
080ET011853	080ET011853	Equivalente	CN	2,5	Icte
080ET043388	080ET043388	Equivalente	AN	17,7	Icte
080ET065599	080ET065599	Equivalente	AN	22,6	Icte
080ET060344	080ET060344	Equivalente	AN	16,9	Icte
080IP017448	080IP017448	Equivalente	AN	2,2	Icte
080ET240579	080ET240579	Equivalente	BN	16,2	Icte
080ET244014	080ET244014	Equivalente	CN	20,9	Icte
080ET048600	080ET048600	Equivalente	CN	22,3	Icte
B_120	2MTE000012995	A4	ABC	18,6	Icte
080ET089903	080ET089903	Equivalente	CAN	40,9	Icte
080ET246024	080ET246024	Equivalente	ABC	7,77	Icte
B_126	2MTE000014898	A4	ABC	9,68	Icte
080ET246823	080ET246823	Equivalente	ABC	12,1	Icte
B_128	2MTE200000003	A4	ABC	22,9	Icte
080ET246824	080ET246824	Equivalente	ABCN	4,12	Icte
080IP017517	080IP017517	Equivalente	AN	1,05	Icte
080ET090087	080ET090087	Equivalente	BCN	16,3	Icte
B_133	2MTE000009141	A4	ABC	17,7	Icte
B_134	2MTE000014298	A4	ABC	38,9	Icte
B_134	2BTE117302732	A4	ABC	0	Icte
080ET241916	080ET241916	Equivalente	ABC	24	Icte
B_137	2MTE000014849	A4	ABC	34	Icte
080ET241917	080ET241917	Equivalente	ABC	8,7	Icte
B_139	2MTE000007818	A4	ABC	1860	Icte
B_140	2MTE000005729	A4	ABC	24	Icte
B_143	2MTE000018764	A4	ABC	37,8	Icte
B_144	2MTE200001593	A4	ABC	6,42	Icte
080ET248459	080ET248459	Equivalente	ABC	12,2	Icte
B_146	2BTE115562125	A4	ABC	0	Icte
B_146	2MTE200240403	A4	ABC	23,1	Icte
B_148	2BTE123354170	A4	ABC	2,09	Icte
050ET249252	050ET249252	Equivalente	ABC	0,269	Icte