

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Aldair Wontroba

**METODOLOGIA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE
ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO: Implementação
em Hardware e Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real**

**Santa Maria, RS
2020**

Aldair Wontroba

**METODOLOGIA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA
IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO: Implementação em Hardware e
Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau em **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes

**Santa Maria, RS
2020**

Wontroba, Aldair

METODOLOGIA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO: Implementação em Hardware e Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real / Aldair Wontroba.- 2020.

127 p.; 30 cm

Orientador: Adriano Peres de Moraes
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2020

1. Faltas de alta impedância 2. Detecção de FAI 3. Classificação 4. Simulação digital em tempo real 5. Redes de distribuição de energia elétrica I. Peres de Moraes, Adriano II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Aldair Wontroba. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Av Prefeito Evandro Berh, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97110-800

Fone (055) 55 997199444, E-mail: aldairwontroba@hotmail.com

Aldair Wontroba

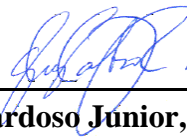
METODOLOGIA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO: Implementação em Hardware e Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau em **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Aprovado em 28 de setembro de 2020:



Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)

NUBIA SILVA DANTAS BRITO Digitally signed by NUBIA SILVA DANTAS BRITO
Date: 2020.11.04 09:36:41 -03'00'

Núbia Silva Dantas Brito, Dr. (UFCEG) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a minha namorada, Maria Helena Ludwig, por ser paciente e por ter me ajudado na caminhada ao longo do mestrado e também da vida, sendo parceira e compreensível.

Agradeço em especial aos meus pais, não só pelo apoio financeiro, mas também pelo exemplo de disciplina, determinação, organização e exemplo que me passaram ao longo da vida.

Também agradeço ao pessoal do grupo LAPES, em especial ao Mairon Gallas que me ajudou sem hesitação neste trabalho e também em outras áreas mais importantes da minha vida.

Ao meu orientador, Professor Adriano Peres de Moraes, pela paciência em corrigir meus erros gramaticais e também pela ajuda ao longo da construção deste trabalho.

Aos professores do grupo CEESP, em especial o professor Ghendy Cardoso Junior, pela coordenação dos trabalhos e também pela amizade e parceria.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, que me proporcionou ensino gratuito e de qualidade desde a graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes pela concessão da bolsa de Mestrado.

Por fim, a todos aqueles não citados nominalmente, mas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

METODOLOGIA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO: Implementação em Hardware e Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real

AUTOR: Aldair Wontroba

ORIENTADOR: Adriano Peres de Moraes

O presente trabalho trata sobre detecção de faltas de alta impedância (FAI) em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. É realizado um estudo aprofundado sobre este tipo de falta, bem como, sobre alguns importantes métodos de detecção de FAI. A partir desta análise, é desenvolvido um método de detecção e classificação de FAI. Uma importante característica da metodologia proposta é o fato de ser capaz de identificar o tipo da FAI, ou seja, com ou sem rompimento de cabo, por exemplo. O algoritmo desenvolvido é fundamentado em componentes harmônicos, principalmente o de terceira ordem. Para extrair informações sobre faltas, utiliza-se as correntes de fase e de neutro. Visando realizar uma análise comparativa, tanto o algoritmo proposto, quanto outros quatro conhecidos métodos de detecção de FAI, foram implementados em uma plataforma de hardware desenvolvida para este fim. Todos os testes foram realizados em tempo real usando metodologia *hardware-in-the-loop* através do simulador OPAL-RT. No total foram realizados 774 testes para cada algoritmo, incluindo dois modelos de FAI com diferentes topologias de solo e configuração de cabo rompido. Casos de *inrush* de transformador, chaveamento de carga e banco de capacitores também foram testados. As simulações de todos os casos se deram através de um sistema de distribuição baseado em um alimentador real, o qual possui como principal característica a presença de ramais monofásicos. A metodologia desenvolvida apresentou um resultado superior quando comparada aos demais métodos testados, mostrando uma assertividade de 88% nos casos de FAI.

Palavras-Chave: Redes de distribuição de energia elétrica, faltas de alta impedância, detecção e classificação, simulação digital em tempo real.

ABSTRACT

DETECTION AND CLASSIFICATION METHODOLOGY OF HIGH IMPEDANCE FAULTS IN DISTRIBUTION NETWORKS: Hardware Implementation and Validation through Real-Time Digital Simulation

AUTHOR: Aldair Wontroba

ADVISOR: Adriano Peres de Morais

The present work deals with the detection of high impedance faults (HIF) in Electricity Distribution Networks. An in-depth study is carried out on this type of fault, as well as on some important HIF detection methods. From this analysis, a HIF detection and classification method is developed. An important feature of the proposed methodology is the fact that it is able to identify the type of HIF, i.e., with or without a cable break, for instance. The developed algorithm is based on harmonic components, mainly the third order. To extract information about faults, phase and neutral currents are used. In order to carry out a comparative analysis, the proposed algorithm and other four known methods of HIF detection were implemented in a hardware platform developed for this purpose. All tests were performed in real time using hardware-in-the-loop simulation through OPAL-RT simulator. In total, 774 tests were performed for each algorithm, including two HIF models with different soil topologies and broken cable configuration. Transformer inrush, load switching and capacitor bank cases were also tested. The simulations of all cases were carried out through a distribution system based on a real feeder, which has, as main characteristic, the presence of single-phase branches. The developed methodology has presented a superior result when compared to the other methods, showing an assertiveness of 88% in the cases of HIF.

Keywords: Distribution network, high impedance fault, detection and classification, hardware-in-the-loop simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Acidentes fatais nos sistemas de distribuição brasileiro.	24
Figura 2.1 – Níveis de proteção de um alimentador.....	29
Figura 2.2 – Ocorrência de FAI com geração de arco elétrico.....	30
Figura 2.3 – Características da forma de onda de uma FAI.	31
Figura 2.4 – Relação de terceiro harmônico na corrente de FAI.....	32
Figura 2.5 – Curva Tensão-Corrente para: (a) areia; (b) asfalto; (c) cascalho; (d) paralelepípedo; (e) grama; (f) solo local dos testes.....	33
Figura 2.6 – Oscilografia de FAI obtida com testes experimentais.....	33
Figura 2.7 – Tipos de ocorrência da FAI: a) Tipo S; b) Tipo RLF; c) Tipo RLC; d) Tipo RLFC.	35
Figura 2.8 – FAI no lado da carga.	37
Figura 2.9 – Modelo utilizando resistências variáveis	38
Figura 2.10 – Modelo de FAI utilizando resistências aleatórias e diodos antiparalelo.....	40
Figura 3.1 – Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação de Gautam e Brahma (2012).	44
Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação proposto por Lima (2016).	46
Figura 4.1 – Fluxograma do método proposto.	49
Figura 4.2 – Fluxograma do algoritmo detector de rompimento de cabo.	51
Figura 4.3 – Comportamento das componentes simétricas para um rompimento de cabo.	53
Figura 4.4 – Fluxograma do algoritmo de detecção de FAI.....	54
Figura 4.5 - Abertura angular do 3° harmônico estabelecida para detecção de FAI.....	57
Figura 4.6 – Comportamento das variáveis do algoritmo para a ocorrência de uma FAI. Em a) a corrente de neutro; b) a porcentagem de 3ºharmônico; c) somatórios dos harmônicos pares e ímpares; d) ângulo de terceiro harmônico; e) tempo do TIMER; e f) respostas do algoritmo.	59
Figura 4.7 – Fluxograma do algoritmo classificador de FAI.	61
Figura 4.8 – Comportamento do modulo de terceiro harmônico nas três fases em (a); comportamento do ângulo do terceiro harmônico nas três fases em (b); e a saída do classificador em (c).....	63
Figura 5.1 – Equipamento RTS utilizado em testes de HIL: OP5700.....	67
Figura 5.2 – Conectores posteriores do OPAL para comunicação com o mundo real.....	67
Figura 5.3 – Esquemático de interação entre os elementos na simulação em tempo real.	68
Figura 5.4 – Kit de desenvolvimento Delfino LAUNCHXL-F28377S.	69
Figura 5.5 – Projeto do <i>hardware</i> para aquisição de sinais analógicos.....	70
Figura 5.6 – <i>Hardware</i> final de aquisição de dados.....	70
Figura 5.7 – <i>Hardware</i> completo ou protótipo de relé de proteção.	71
Figura 5.8 – <i>Hardware</i> e OP5700 conectados para simulações do tipo HIL.	72

Figura 5.9 – Esquemático simplificado do alimentador utilizado.	73
Figura 5.10 – Modelo de FAI utilizando resistências variáveis.....	75
Figura 5.11 – Modelo de FAI utilizando variação randômica.	76
Figura 6.1 – Resultado dos algoritmos para todos os casos testados.	84
Figura 6.2 – Índice de segurança dos algoritmos para os casos chaveamento de carga, chaveamento de capacitor e chaveamento de transformador.	86
Figura 6.3 – Índice de disponibilidade dos algoritmos para os casos de FAI com o modelo 1 e modelo 2.....	87
Figura 6.4 – Resultado dos algoritmos para os casos de Religamento com FAI do modelo 1 e com modelo 2.....	88
Figura 6.5 – Índice de disponibilidade dos algoritmos para os tipos de FAI com o modelo 1.89	
Figura 6.6 – Índice de disponibilidade dos algoritmos para os tipos de FAI com o modelo 2.90	
Figura 6.7 – Taxa de acerto dos algoritmos para classificação de fase.	92
Figura 6.8 – Taxa de acerto do algoritmo E para classificação de tipos de FAI.....	93
Figura 6.9 – (a) Espectro harmônico para uma FAI com o modelo 1, (b) para um chaveamento de transformador, e (c) para uma FAI com o modelo 2.	95
Figura 6.10 – (I) Tensão no ponto de falta, (II) corrente no ponto de falta, e (III) espectro harmônico da corrente de falta para uma FAI do Tipo RLF na coluna (a) e uma FAI do Tipo RLC na coluna (b), ambas com o modelo 2.....	96
Figura 6.11 – Oscilografia das correntes de fase para um chaveamento de transformador.....	97
Figura 6.12 – Corrente no ponto de falta em (a), tensão na subestação em (b), e saída do filtro CODO em (c) para uma FAI com o modelo 2.	99
Figura 6.13 – Corrente no ponto de falta em (a), tensão na subestação em (b), e saída do filtro CODO em (c) para uma FAI com o modelo 1.	100
Figura 6.14 – Curva VxI para uma FAI com modelo 1 em (a), e para uma FAI com modelo 2 em (b).	101
Figura 6.15 – Saída do CODO para um caso de FAI onde a detecção levou mais de 1 segundo.	101
Figura 6.16 – Oscilações numéricas ocasionadas devido a um rompimento de cabo.	102
Figura 6.17 – Módulo em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase para uma FAI do Tipo RLC.....	104
Figura 6.18 – Módulo em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase para uma FAI do Tipo RLFC.	105
Figura 6.19 – Corrente de neutro para uma FAI do Tipo S na fase “A” em (a), na fase “B” em (b), e na fase “C” em (c).	107
Figura 6.20 – Corrente no ponto de FAI e percentual harmônico para o solo 1 em (a), solo 2 em (b), solo 3 em (c), e solo 4 em (d).	108
Figura 6.21 – Amplitude e ângulo de terceiro harmônico para uma FAI do Tipo S em (a), Tipo RLF em (b), Tipo RLC em (c), e do Tipo RLFC em (d).	110
Figura 6.22 – Amplitude e ângulo de terceiro harmônico para uma FAI do Tipo S em diferentes	

superfícies do modelo 1 em (a) e do modelo 2 em (b).	111
Figura 6.23 – Componentes de sequência positiva em azul e sequência negativa em vermelho para um rompimento de cabo no local “C” nas fases: “A” em (a), “B” em (b), e “C” em (c).	112
Figura 6.24 – Amplitude em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase. Em (c) tem-se a saída do classificador de fase e de tipo de FAI.	114
Figura 6.25 – Amplitude em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase. Em (c) tem-se a saída do classificador de fase e de tipo de FAI.	116
Figura 6.26 – Comparativo de uma oscilografia obtida pelo hardware e o sinal gerado pelo hypersim internamente.	119
Figura 6.27 – Captura pelo hardware de um espectro harmônico sobre um sinal senoidal de 10V pipo a pico.	119
Figura 6.28 – Demonstrativo da simulação em HIL, onde em (a) tem-se a tensão na subestação, em (b) a corrente na subestação, em (c) a corrente de neutro na subestação, e em (d) o sinal de TRIP gerado ao se detectar uma FAI.	121
Figura 6.29 – Tempos de simulação do RTS para os casos de FAI em (a) e também para os casos considerando <i>inrush</i> de transformador em (b).	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores típicos de corrente de FAI em diferentes superfícies.	30
Tabela 2.2 – Principais características da forma de onda da corrente de uma FAI.....	34
Tabela 2.3 – Coeficientes do polinômio de R_2 para cada tipo de solo.	38
Tabela 3.1 – Limiares adotados.	46
Tabela 5.1 – Configuração de solo utilizada no modelo de variações randômicas.	77
Tabela 6.1 – Resultado da detecção de FAI para todos os casos testados.....	84
Tabela 6.2 – Resultado da detecção para casos de outros eventos.	85
Tabela 6.3 – Resultado da detecção para casos de FAI com o modelo 1 e o modelo 2.	86
Tabela 6.4 – Resultado da detecção para casos de Religamento de ramal considerando inrush de transformador e FAI com o modelo 1 e o modelo 2.....	87
Tabela 6.5 – Resultado da detecção para os quatro tipos de FAI com o modelo 1.	88
Tabela 6.6 – Resultado da detecção para os quatro tipos de FAI com o modelo 2.	89
Tabela 6.7 – Tempo médio (em ms) de detecção dos algoritmos em diferentes casos testados.	91
Tabela 6.8 – Sequência de leituras do terceiro harmônico para um FAI com o modelo 2.....	117
Tabela 6.9 – Porcentagem de terceiro harmônico em diferentes solos do modelo 1.	118

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
CODO	<i>Closing Opening Difference Operation</i>
EKF	Filtro Estendido de Kalman
FAI	Falta de Alta Impedância
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
HIL	<i>Hardware in the Loop</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
MM	Morfologia Matemática
MMG	Gradiente Morfológico Multiresolução
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTS	<i>Real Time Simulator</i>
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIL	Software in the Loop
STFT	<i>Short-time Fourier Transform</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
THD	Taxa de Distorção Harmônica
UCM	<i>User Code Mode</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	23
1.2	MOTIVAÇÃO	24
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	25
1.4	ESTADO DA ARTE	25
1.5	CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	27
1.6	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	28
2	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	29
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	29
2.2	CARACTERÍSTICAS DAS FAI	30
2.3	TIPOS DE FAI	34
2.4	MODELOS DE FAI	37
2.4.1	Modelo das resistências variáveis (SANTOS et al., 2013)	37
2.4.2	Modelo utilizando variação randômica (GAUTAM; BRAHMA, 2012)	39
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
3	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FAI	41
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	41
3.2	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FAI	41
3.2.1	Método de Torres et al. (2014)	41
3.2.2	Método de Gautam e Brahma (2012)	42
3.2.3	Método de Lima (2016)	44
3.2.4	Método de Subramaniam e Venkataraman (2012)	47
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
4	METODOLOGIA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FAI	49
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	49
4.2	DETECTOR DE ROMPIMENTO DE CABO	50
4.3	ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FAI	53
4.4	ALGORITMO DE CLASSIFICAÇÃO DE FAI	60
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS	65
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	65
5.2	AMBIENTE DE TESTES EM <i>HARDWARE-IN-THE-LOOP(HIL)</i>	65
5.2.1	Simulador em Tempo Real da OPAL-RT	66
5.2.2	<i>Hardware</i> desenvolvido	68
5.3	SISTEMA TESTE	72
5.3.1	Casos testados	74
5.4	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	79
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	83
6.2	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA	83
6.2.1	Detecção de FAI	83
6.2.2	Classificação de fase	91
6.2.3	Classificação de tipos de FAI	92
6.3	AVALIAÇÃO QUALITATIVA	94
6.3.1	Algoritmo A	94
6.3.2	Algoritmo B	98
6.3.3	Algoritmo C	103

6.3.4	Algoritmo D.....	105
6.3.5	Algoritmo E.....	109
6.4	DISCUSSAO DOS MODELOS DE FAI.....	117
6.5	AVALIACAO DO AMBIENTE DE TESTES EM HIL.....	118
6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	123
7.1	CONCLUSÕES	123
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
8	REFERÊNCIAS.....	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nas últimas décadas, uma grande expansão dos sistemas elétricos de potência (SEP) vem sendo registrada no Brasil e no mundo. Esse crescimento se deve não apenas ao aumento da atividade produtora, mas também a novos desafios, dentre os quais destaca-se aqui os referentes ao setor de proteção dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE).

Historicamente, os setores da geração e transmissão de energia elétrica receberam atenção especial em relação aos investimentos, quando comparados com o setor de distribuição de energia elétrica. Este cenário começou a mudar com a desregulamentação do setor elétrico e a pressão crescente da sociedade por uma energia de melhor qualidade. Por exemplo, os sistemas de proteção utilizados nos SDEE, que eram constituídos primordialmente por chaves fusíveis e poucos religadores eletromecânicos, vêm sofrendo um *retrofit* com instalação de IEDs (do inglês *Intelligent Electronic Device*) religadores microprocessados, indicadores de falta, etc., sendo a maioria destes com capacidade de operação remota.

No Brasil, os SDEE são predominantemente do tipo ramais aéreos, devido ao custo de implementação menor quando comparado com as redes subterrâneas. Entretanto, ramais aéreos são mais suscetíveis a ocorrência de defeitos por estarem expostos às intempéries. Os defeitos mais comuns são curto-circuito entre condutores, rompimento de condutor e contato de condutor com superfícies que estão sob diferentes potenciais elétricos (vegetação e edificações, por exemplo). A detecção desses defeitos deve ser realizada com rapidez e de forma confiável, caso contrário, podem danificar os equipamentos dos consumidores e da própria rede elétrica. Além disso, podem colocar a segurança da população em risco, visto que o curto-circuito pode vir a provocar um incêndio. Em casos de faltas de alta impedância (FAI), que é o contato do condutor com superfícies de alta resistência (terra, areia, grama, árvores, etc.), a detecção é ainda mais complicada devido à baixa amplitude de corrente o que pode comprometer a eficácia da proteção de sobrecorrente tradicional.

Com intuito de reduzir o tempo em que o condutor fica em contato com uma superfície de alta resistência, gerando uma FAI, diversas pesquisas vêm sendo realizadas. No entanto, mesmo havendo mais de meio século em pesquisas envolvendo detecção de FAI, ainda não há um método que seja completamente assertivo para todos os tipos de FAI. Isto ocorre porque há

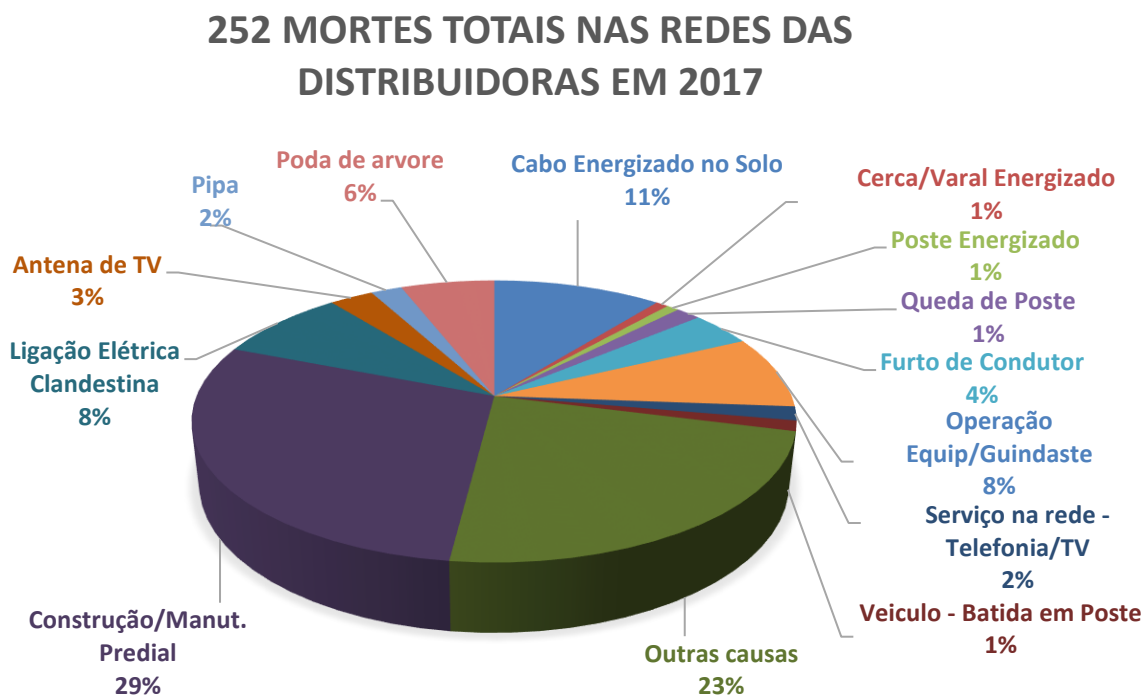
casos em que a amplitude da corrente originada pela FAI é baixa ou então possui característica muito semelhante a uma carga, o que dificulta a tarefa dos detectores.

1.2 MOTIVAÇÃO

Uma pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica (ABRADEE) relata que no ano de 2017, foram registrados pelas distribuidoras de energia 863 acidentes em todo o País, dos quais, 252 provocaram a morte das vítimas, sendo 11% dos casos provocado por condutor energizado ao solo, caso típico de FAI. Além disso, outros casos, característicos de FAI, como, acidentes de veículos envolvendo postes, queda de postes, queda de condutores energizados sobre cerca ou varal, poste energizado e demais causas somam um total de 27% dos casos. Portanto, os casos relacionados com FAI estão entre os causadores de morte no país relacionados com acidentes na rede de distribuição de energia elétrica, ficando atrás apenas da construção civil, como ilustra a Figura 1.1. Outros danos graves decorrentes de FAI, são os incêndios em edificações e em áreas rurais, os quais podem resultar em multas milionárias para as concessionárias.

Neste contexto, o desenvolvimento de métodos de detecção de FAI com uma maior

Figura 1.1 – Acidentes fatais nos sistemas de distribuição brasileiro.



Fonte: adaptado de (ABRADEE, 2018).

confiabilidade para todos os tipos de FAI são de extrema importância, tanto para a sociedade, quanto para as concessionárias distribuidora de energia elétrica. A detecção rápida de uma FAI pode reduzir o tempo que um condutor energizado fica ao solo e auxiliar algoritmos de localização de FAI, reduzindo o risco de acidentes com pessoas e animais.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

No contexto do tema de proteção de redes de distribuição de energia elétrica, este trabalho de mestrado tem por objetivo a **elaboração de um método de detecção e classificação de FAI e validação através de simulação em hardware-in-the-loop**. Para alcançar este objetivo, alguns objetivos específicos são necessários, são eles:

- Modelar sistema teste e modelos de FAI para uso em simulação digital em tempo real;
- Desenvolver uma plataforma (hardware) para realizar testes de algoritmos em tempo real;
- Desenvolver algoritmo de detecção e classificação de FAI fundamentado em análise harmônica;
- Incorporar em hardware o método de detecção e classificação de FAI desenvolvido, e também outros quatro métodos de detecção de FAI;
- Avaliar qualitativamente e quantitativamente os métodos de detecção de FAI, de modo a destacar as suas vantagens e desvantagens para diferentes cenários.

1.4 ESTADO DA ARTE

Diversos trabalhos tem sido publicados nas últimas décadas com objetivo de melhorar a confiabilidade dos detectores de FAI. Métodos com diferentes topologias já foram desenvolvidos e testados, entretanto, apesar de haver mais de 60 anos de pesquisa relacionada ao assunto, o problema ainda persiste devido a sua dificuldade em detectar com clareza e confiabilidade um evento de FAI. Nesta secção será apresentada uma revisão sobre alguns trabalhos publicados nos últimos anos sobre detecção de FAI.

Um dos métodos proposto por Sultan et al. (1992) faz uso de uma rede neural *perceptron* multicamada com uma camada escondida para detecção de FAI. Neste método, quando há uma variação significativa no valor RMS da corrente de fase, é obtida uma amostragem de corrente,

contendo 32 amostras por ciclo de rede. Estes valores, uma vez normalizados, são processados na rede *perceptron* multicamada em conjunto com uma variável cujo calor será “0” ou “1” em função da quantidade de amostras com valor maior que 30% do valor de pico instantâneo de corrente, totalizando 33 neurônios de entrada. A saída binária da rede indica se há ou não a presença de uma FAI. Segundo os autores, dentre os casos simulados, houve aproximadamente 75% de acerto. Porém, em 20% dos casos ocorreu de atuação indevida para certas cargas específicas.

Benner e Russel (1997) propuseram um método baseado na análise harmônica da corrente nos alimentadores, comportamento randômico do sinal e energia, e através destas variáveis geraram um índice de nível de confiança, através do qual, identifica se o distúrbio presente se caracteriza como uma FAI. Utilizando dados reais, o método foi validado com a implementação em um relé comercial. No entanto, não foi apresentado a confiabilidade do método para outros eventos que ocorrem na rede.

A técnica proposta por Samantaray e Dash (2010) utiliza o filtro estendido de Kalman (EKF) e *Support Vector Machine* (SVM) para realizar a detecção da FAI. A componente fundamental de corrente e as componentes harmônicas de ordem ímpar são extraídas através do filtro de Kalman, e utilizadas como entrada no SVM, o qual foi previamente treinado com diversos casos de FAI. O método foi validado apenas com dados simulados computacionalmente, utilizando o modelo de FAI usado por Sheng e Rovnyak (2004).

Gautam e Brahma (2012) propuseram um algoritmo baseado em Morfologia Matemática (MM). O algoritmo monitora o sinal de tensão, de forma a identificar distorções que ocorrem no sinal. Como FAI geram correntes com ruído, o algoritmo tenta identificar distorções a partir de um determinado limiar, e assim identificar possíveis casos de FAI. O método foi testado através simulações computacionais e apresentou bons resultados quando testado para FAI e também outros eventos. Uma desvantagem do método é sua grande sensibilidade a ruídos

Subramanian e Venkataraman (2012) propuseram três métodos para detecção de FAI individualmente, onde utilizando a corrente de neutro como fonte de informação nas suas metodologias. O método integrado é fundamentado na presença de arco, na não linearidade e aleatoriedade da corrente. O segundo método é baseado na Transformada Wavelet para a detecção. Já no terceiro, utiliza o 3º harmônico como critério principal de detecção da FAI. Os métodos foram testados individualmente e apresentaram detecção de FAI sem nenhuma restrição, porém não foram capazes de distinguir a FAI de eventos de saturação de transformadores. Uma das principais contribuições do trabalho foi a comparação de três

métodos bem com características bem distintas.

Torres et al. (2014) utilizam a taxa de distorção harmônica (THD) e a avaliação de harmônicas ímpares e harmônicas pares, além de analisar o 3º harmônico nas correntes de fase para detectar a FAI. Apesar de simples, o método apresenta uma boa resposta para diferentes eventos de FAI.

Lima et al. (2018) utilizaram *short-time Fourier transform* (STFT) para extração dos componentes harmônicos da corrente. A partir da função da transformada obtém-se os harmônicos de ordem 2, 3 e 5. Uma lógica de detecção utilizando estes harmônicos é utilizada para detecção de FAI. O algoritmo mostrou-se robusto, conseguindo distinguir a FAI de outros eventos.

Sarlak et al. (2010) propuseram um algoritmo para reconhecimento de padrões. Tal algoritmo é utilizado para detectar e classificar a FAI de outros eventos. O método faz uso do gradiente morfológico multiresolução para extração das características das correntes dos três ciclos e meio posteriores a ocorrência do distúrbio.

Milioudis et al. (2012) propôs uma técnica de detecção de FAI baseada em conceitos de *smart grids*, a qual monitora a impedância da rede por meio de uma tecnologia conhecida como PLC (*Power Line Communications*) que sobrepõe sinais de frequência diferentes da fundamental para comunicação. O algoritmo detecta uma FAI no momento em que ocorre uma variação abrupta na impedância medida na rede.

Senger et al (2010) propôs uma função que monitora as correntes do alimentador medidas na subestação, a qual opera com uma sensibilidade muito mais elevada que as proteções convencionais. O autor também propôs a utilização de condições adicionais que devem ser verificadas antes de gerar a atuação do detector proposto. Condicionalmente, o valor da corrente de neutro deve estar acima de um valor pré-ajustado e a corrente de fase entre dois limiares também pré-ajustados.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

- O trabalho desenvolvido traz uma abordagem sobre simulação digital de FAI em tempo real, e testes em *hardware-in-the-loop* (HIL);
- A implementação em hardware de quatro algoritmos distintos de detecção e classificação de FAI, bem como, a análise comparativa sob testes em tempo real;
- Implementação de dois modelos de FAI, considerando rompimento de cabo e falta no

- lado da carga, para uso em simulação digital em tempo real;
- Desenvolvimento de plataforma para implementação de algoritmos de detecção e classificação de FAI em hardware;
 - Desenvolvimento de algoritmo capaz de detectar e classificar o tipo de FAI;
 - Análise comparativa de diferentes algoritmos de detecção de FAI por meio de simulações tempo real.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 será apresentada uma descrição detalhada das características das FAI. Ainda neste capítulo será mostrado os diferentes tipos de FAI, bem como, os seus efeitos nos sistemas trifásicos. Ao final do capítulo será elucidado dois modelos de FAI, os quais são, atualmente, mais utilizados na literatura.

Os métodos de detecção de FAI, que serão utilizados na análise comparativa e implementados em hardware, são descritos de forma detalhada no Capítulo 3. Já no Capítulo 4 é apresentado o método proposto para detecção de FAI, assim como o método proposto para a classificação do tipo de FAI.

No Capítulo 5 é mostrado a metodologia de avaliação dos métodos. A descrição do hardware utilizado para implementação dos algoritmos é descrita nesta etapa, assim como, é apresentado o ambiente de simulação utilizado (OPAL-RT/Hypersim) para realização de testes do tipo *hardware-in-the-loop* (HIL). Também neste capítulo é apresentado o sistema teste utilizado e os casos testados.

O Capítulo 6 traz os resultados obtidos a partir dos testes realizados nos algoritmos. Ainda neste capítulo, é discutido os diferentes modelos de FAI.

Por fim, no Capítulo 7, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

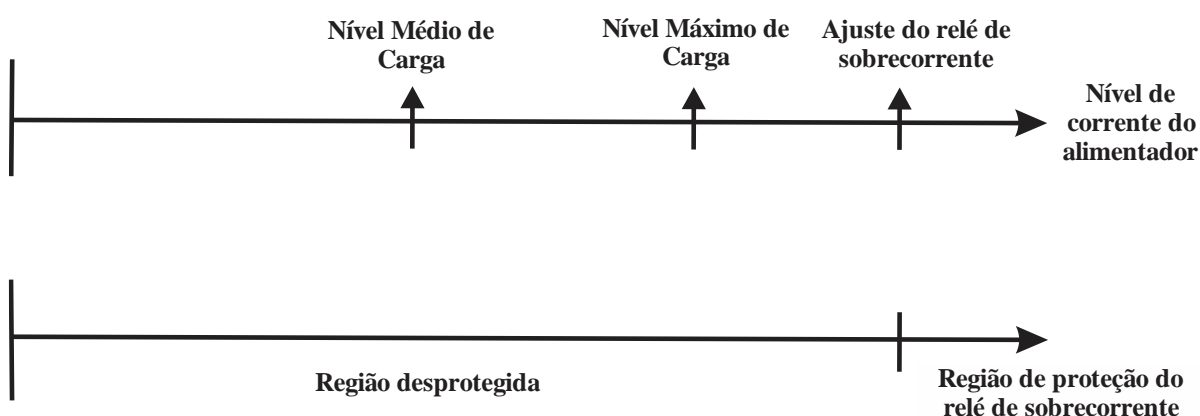
2 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Faltas de alta impedância, também conhecidas como FAI são um tipo de falta muito comum nas redes aéreas de distribuição de energia elétrica. As FAI ocorrem quando um condutor da rede de distribuição entra em contato com uma superfície de alta resistência, como árvores, edificações, solos de concreto ou asfalto, grama seca ou úmida, etc. Devido à alta resistência destas superfícies de contato, a corrente gerada por uma FAI possui uma baixa amplitude, geralmente entre 0 e 100 A (HOU, 2007).

Esse tipo de falta ocorre em sistemas com tensões de 4 kV até 34,5 kV (TENGDIN et al., 1996), isso porque acima deste nível de tensão, as amplitudes das correntes das faltas fase-terra começam a ficar significativas, podendo ser detectadas por meios tradicionais de proteção baseados em sobrecorrente, o que não ocorre em casos de FAI (HOU, 2007). Apresenta-se na Figura 2.1 os níveis de proteção dos relés de sobrecorrente, onde o ajuste está acima do nível máximo de carga do alimentador. Em casos de FAI, devido à baixa amplitude da corrente, o nível de corrente do alimentador permanece dentro da região desprotegida, criando então a necessidade de uma nova medida de proteção para detectar tais problemas, usualmente denominados de detectores de FAI.

Figura 2.1 – Níveis de proteção de um alimentador.



Fonte: adaptado de (RUSSELL, 1989).

Os níveis de corrente de uma FAI também variam de acordo com a superfície de contato. A Tabela 2.1 apresenta a magnitude da corrente de falta para alguns tipos de solos que foram

Tabela 2.1 – Valores típicos de corrente de FAI em diferentes superfícies.

Superfície de contato	Corrente típica de falta (A)
Asfalto seco	0
Areia seca	0
Concreto (não armado)	0
Areia molhada	15
Gramma seca	25
Gramma molhada	50
Concreto (armado)	75

Fonte: adaptado de (RUSSELL; CHINCHALI, 1989).

verificados em testes experimentais no trabalho (RUSSELL; CHINCHALI, 1989).

2.2 CARACTERÍSTICAS DAS FAI

Uma das principais características das FAI é a presença de arco elétrico. Independentemente de ter ocorrido contato da rede com uma árvore, edificação, ou então cabo diretamente caído ao solo, a tendência é o aparecimento do arco elétrico. Isto ocorre devido ao elevado potencial dos SDEE e por haver lacunas de ar tanto abaixo do solo, como próximo do material em contato com o condutor (RUSSELL, 1989). Essas lacunas de ar estão presentes pois o contato do cabo com a superfície é muito fraco, ficando susceptível até mesmo a movimentos bruscos do condutor. Na Figura 2.2 é mostrada um caso de FAI onde se pode ver

Figura 2.2 – Ocorrência de FAI com geração de arco elétrico.

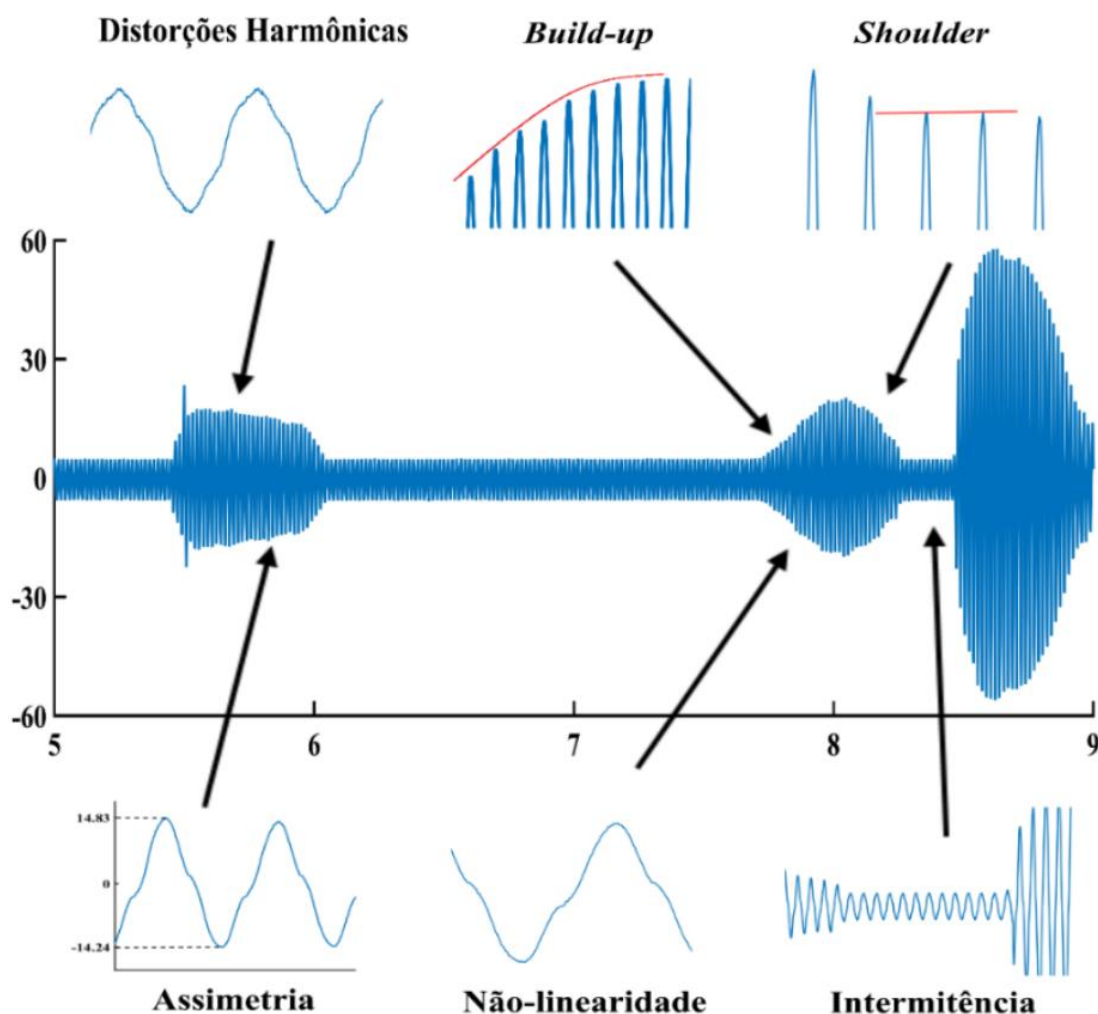


Fonte: Autoria própria.

o fogo gerado pelo arco elétrico ao longo do condutor que está em contato com o solo.

Como o arco elétrico é interrompido e reiniciado a cada meio ciclo de rede, a sua presença é marcante na forma de onda da corrente, provocando interrupção e reinição abruptas da corrente próximo a passagem por zero. A Figura 2.3 mostra as principais características da forma de onda da corrente durante uma FAI. É possível observar as rápidas variações próximas da passagem por zero, esta característica gera harmônicos de ordem ímpar na corrente, principalmente o harmônico de 3ª ordem com ângulo próximo ao 180° (LIU et al., 2016). Segundo Liu et al. (2016), a corrente harmônica de 3ª ordem é responsável de 5% a 30% da corrente total de FAI, dependendo do tipo de solo e também da amplitude da corrente de FAI, conforme mostra a Figura 2.4.

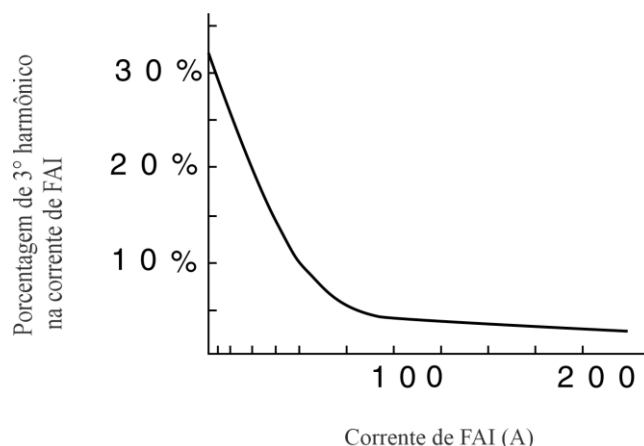
Figura 2.3 – Características da forma de onda de uma FAI.



Fonte: (LIMA, 2016).

Na forma de onda da corrente, o arco elétrico também é responsável pela intermitência

Figura 2.4 – Relação de terceiro harmônico na corrente de FAI.



Fonte: adaptado de Liu et al. (2016).

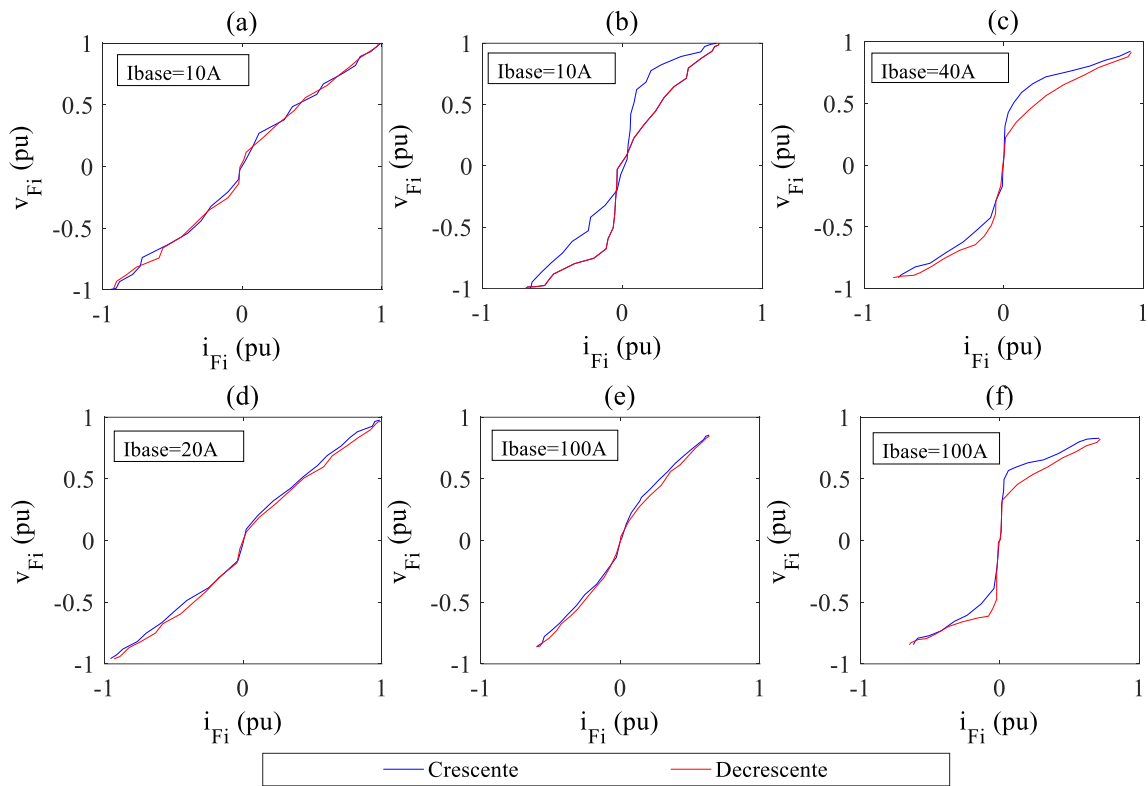
e assimetria. A intermitência geralmente ocorre devida a extinção do arco por um determinado período (vários ciclos de rede). Já o efeito da assimetria é causado pela tensão de ruptura do arco elétrico, devido as tensões de ruptura negativa e positiva serem diferentes (ZAMANAN; SYKULSKI, 2006).

A não-linearidade da corrente, mostrada na Figura 2.3, existe devido a curva *tensão* (V) \times *corrente* (I) característica em casos de FAI. Segundo Santos et al., (2013), essa deformação na curva VxI também varia conforme o tipo de solo. Na Figura 2.5 é mostrada a curva VxI para seis diferentes tipos de solo que foram ensaiados pelo autor.

Outra característica presente na FAI são os períodos de *buildup* e o *shoulder* que aparecem na forma de onda da corrente. O *buildup* é o período relativo ao crescimento da corrente em função do tempo, já no *shoulder* ocorre a estabilização da corrente por determinados períodos. Na Figura 2.3 pode ser observada essas características após o surgimento da corrente de FAI. Já a Figura 2.6 mostra a oscilografia obtida através de testes experimentais de FAI realizados por (LEÃO et al., 2020) em galhos de castanhola, onde pode-se ver os períodos de buildup e shoulder.

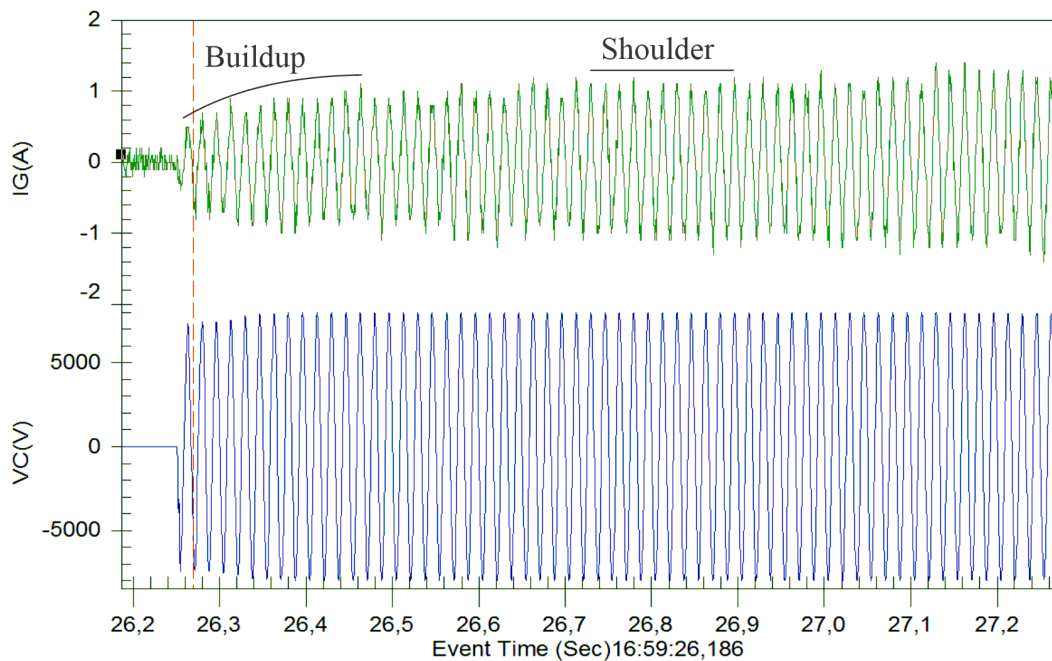
A variação aleatória na amplitude da corrente e na intermitência são outras características presentes na FAI (PARISE; GRASSELLI; DI LUOZZO, 1993), isso pode ser visto ainda na Figura 2.6, onde o comportamento aleatório da corrente de FAI aparece.

Figura 2.5 – Curva Tensão-Corrente para: (a) areia; (b) asfalto; (c) cascalho; (d) paralelepípedo; (e) grama; (f) solo local dos testes.



Fonte: adaptado de (SANTOS et al., 2013).

Figura 2.6 – Oscilografia de FAI obtida com testes experimentais.



Fonte: adaptado (LEÃO et al., 2020)

Componentes de alta frequência na corrente também são comuns em FAI. Tais componentes surgem devido ao arco elétrico (GHADERI; GINN III; MOHAMMADPOUR, 2017). Muitos detectores desenvolvidos na literatura utilizam componentes de alta frequência na tomada de decisão, no entanto, em certos casos, o próprio SDEE irá filtrar esses componentes devido a presença da capacitância intrínseca da rede ou de bancos capacitivos.

Um resumo das principais características da forma de onda da corrente de uma FAI é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Principais características da forma de onda da corrente de uma FAI.

Intermitência	Interrupção da corrente em determinados momentos da ocorrência da FAI.
Assimetria	Diferença entre o semi-ciclo positivo e negativo devido à tensão de ruptura do arco elétrico.
Buildup e shoulder	Crescimento da corrente após início do evento e estabilização durante ocorrência, respectivamente.
Aleatoriedade	Variação randômica na amplitude e na intermitência.
Não-linearidade	Curva $V \times I$ não linear devido ao arco elétrico e ao tipo de solo.
Harmônicos	Há presença de harmônicos na corrente devido principalmente ao arco elétrico. O harmônico mais significativo é o 3º, e em sequência os demais ímpares. Os harmônicos pares possuem menor amplitude e estão presentes devido a assimétrica da corrente.
Alta frequência	Há componentes de alta frequência na corrente causados pelo arco elétrico.

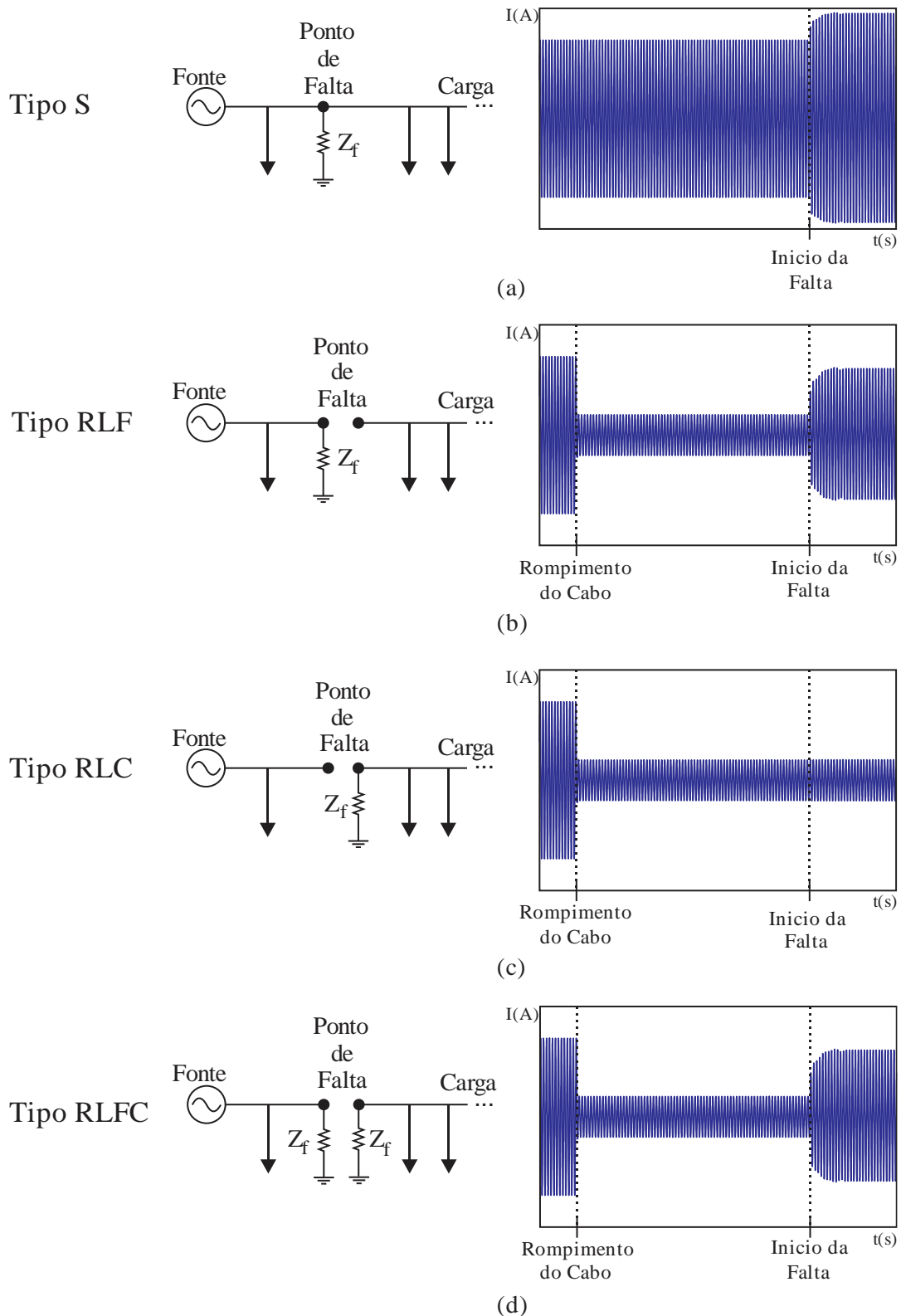
Fonte: adaptado de (GHADERI; GINN III; MOHAMMADPOUR, 2017).

2.3 TIPOS DE FAI

Embora a maioria dos trabalhos tratem a FAI como única, isto é, do tipo *shunt* e sem variações, existem diferentes formas de contato do condutor com a superfície que podem resultar no mau desempenho dos métodos de detecção. As FAI podem ser classificadas em defeito com ou sem rompimento do condutor. Caso ocorra o rompimento do condutor, a FAI ainda pode ser dividida em rompimento do lado da fonte, do lado da carga ou em ambos os lados. Na Figura 2.7 é mostrado os quatro casos mais típicos de ocorrência: (a) falta shunt (Tipo

S) (sem rompimento de condutor); (b) rompimento com FAI no lado da fonte (Tipo RLF); (c) rompimento com FAI no lado da carga (Tipo RLC); e (d) rompimento de cabo com FAI em

Figura 2.7 – Tipos de ocorrência da FAI: a) Tipo S; b) Tipo RLF; c) Tipo RLC; d) Tipo RLFC.



Fonte: Autoria própria

ambos os lados (Tipo RLFC). Em casos de FAI que ocorre o rompimento do condutor, pode haver uma mudança no perfil de carga do alimentador. Essa mudança pode ou não interferir no algoritmo de detecção.

Ainda na Figura 2.7, a forma de onda da corrente de fase sob FAI é representada para cada tipo de FAI. Nota-se que para o caso de FAI *shunt* sem rompimento de cabo, Figura 2.7(a), não há alteração na corrente de carga, apenas o incremento da corrente de FAI após o instante de contato. Em casos de cabo rompido do lado da fonte, Figura 2.7(b) e (d), irá ocorrer a redução da corrente de fase e após alguns instantes a corrente de FAI se somará a corrente de fase. Em casos de FAI com rompimento do cabo e contato do lado da carga, Figura 2.7(c) o único efeito presente será a redução da corrente de carga, ficando mais difícil a detecção da FAI pela corrente de fase nesses casos.

Segundo Nakagomi (2006), o tempo entre o rompimento do condutor e o contato com o solo pode ser calculado pela Equação (2.1),

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2.1)$$

Onde:

h é a altura da rede primária (geralmente entre 8 e 10 metros);

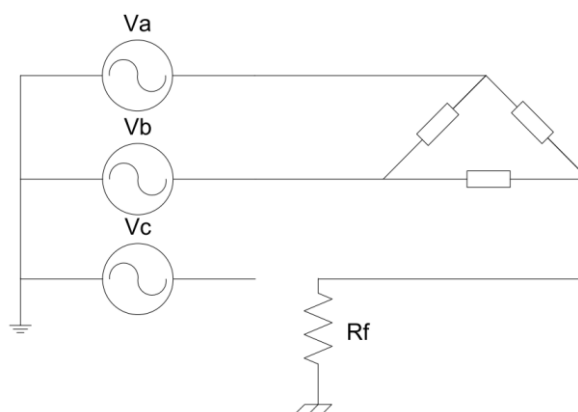
g é a aceleração da gravidade;

t_{queda} é o tempo que o condutor leva para cair até o solo.

O tempo de queda gira em torno de pouco mais de 1 segundo, porém pode variar dependendo da altura da rede, da vegetação presente abaixo da rede e também da presença de outros objetos que podem entrar em contato com o condutor.

Mesmo não apresentando características visíveis de FAI, casos como o mostrado na Figura 2.7(c), ou seja, rompimento de cabo no lado da carga podem provocar uma FAI. Isso porque em redes trifásicas a tensão no lado da carga estará presente devido a ligação dos transformadores da rede. O único caso em que não haverá tensão no ponto de falta do lado da carga é em ramais monofásicos. Na Figura 2.8 é possível visualizar de forma mais clara como isso ocorre. A corrente de FAI é fornecida pelas fases “sãs” através das ligações delta dos transformadores. Apesar da maior parte do sistema de distribuição brasileiro possuir esta característica, é importante salientar que isso irá ocorrer em alimentadores predominantemente

Figura 2.8 – FAI no lado da carga.



Fonte: (FARIAS, 2013).

trifásicos com ligação do transformador em estrela aterrado na subestação e em delta nos transformadores ao longo da rede.

Os algoritmos de detecção de FAI, que fazem uso da corrente de fase no seu processo de decisão, normalmente apresentam algum tipo de erro nestes casos. Uma das alternativas para detecção deste tipo de FAI é a utilização da corrente de neutro, ou então a corrente das demais fases.

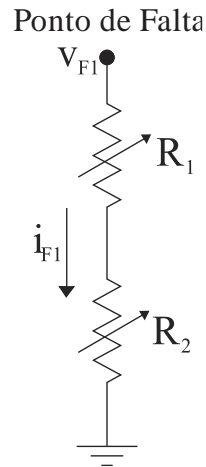
2.4 MODELOS DE FAI

De modo a representar os efeitos das FAI por meio de simulação computacional, modelos elétricos de FAI são propostos na literatura. Os modelos mais utilizados são: o modelo que utiliza dois diodos em antiparalelo acoplados junto a uma fonte de tensão contínua e uma resistência (GAUTAM; BRAHMA, 2012), o modelo que utiliza resistências variáveis que empregam a curva $V \times I$ e variações no domínio do tempo (SANTOS et al., 2013). Além destes, alguns autores utilizam modelos de arco elétrico para representar uma FAI. Nas próximas subsecções serão apresentados os dois modelos mais utilizados nos estudos de FAI.

2.4.1 Modelo das resistências variáveis (SANTOS et al., 2013)

O modelo proposto por Santos et al. (2013) é na verdade uma adaptação do modelo de Nam et al.(2001), onde os autores utilizam duas resistências variáveis para representar uma FAI, conforme mostrado na Figura 2.9. Neste modelo, o resistor R_2 representa variações no

Figura 2.9 – Modelo utilizando resistências variáveis



Fonte: (WONTROBA et al., 2019b)

domínio do tempo como *buildup* e *shoulder*, o resistor R_1 representa as curvas V_{xI} correspondente para cada tipo de solo, como mostrado na Figura 2.5.

Segundo Santos et al. (2013), R_2 pode ser representado por um polinômio de ordem k :

$$R_2(t) = \begin{cases} c_k t^k + c_{k-1} t^{k-1} + \dots + c_1 t + c_0, & \text{se } t < \Delta t \\ 10^{-5}, & \text{se } t \geq \Delta t \end{cases} \quad (2.2)$$

Onde os coeficientes desse polinômio (c) são dados na Tabela 2.3 em função de cada tipo de solo descrito. Os coeficientes (c) foram obtidos através de experimentos de FAI realizados pelos autores. Ainda na Equação (2.2), os autores consideram que esses valores são válidos apenas para o início de uma falha, quando ela ultrapassar um determinado tempo Δt , R_2 passa a ser considerado uma constante.

Tabela 2.3 – Coeficientes do polinômio de R_2 para cada tipo de solo.

Coeficientes	Tipos de Solo					
	Areia	Asfalto	Cascalho	Paralelepípedo	Grama	Solo local
c_8	3,25E11	3,2E12	1,29E8	6,61E9	6,5E10	0
c_7	-2,9E11	-3,0E12	-2,92E8	-1,66E9	-5,7E10	0
c_6	1,14E11	1,1E12	2,73E8	1,91E9	2,0E10	0
c_5	-2,3E10	-2,5E11	-1,37E8	-8,99E8	-4,00E9	-3,05E6
c_4	2,84E9	3,1E10	4,00E7	2,18E8	4,47E8	2,66E6
c_3	-1,98E8	-2,3E9	-6,89E6	-2,87E7	-2,91E7	-8,08E5
c_2	7,74E6	9,52E7	6,88E5	2,01E6	1,05E6	1,02E5
c_1	-1,55E5	-1,98E6	-3,79E4	-7,10E4	-2,03E4	-6,78E3
c_0	1,68E3	1,68E4	1,10E3	1,34E3	2,24E2	5,13E2

Fonte: adaptado (SANTOS et al., 2013).

As curvas mostradas na Figura 2.5 são representadas pelo resistor R_1 como parâmetros. Tais dados também foram obtidos através de experimentos em campo de FAI realizados pelos autores. Como pode ser visto na Figura 2.5, existe uma curva ascendente e uma descendente, por isso, a resistência variável R_1 é dividida em duas partes. Um algoritmo externo monitora a tensão no ponto de falta e controla qual das curvas deve ser aplicada a resistência R_1 .

Como os valores correspondente das curvas da Figura 2.5 são dados em uma tabela, o cálculo exato de R_1 é feito localizando qual o ponto da curva está mais próximo do valor de tensão medido no ponto de falta e então interpolado os valores da tabela de modo a encontrar o valor mais próximo. A Equação (2.3) mostra como é feita a interpolação após definir os valores mais próximos de V e I correspondente ao ponto de falta. Uma vez obtido $v_F(t)$ e $i_F(t)$, é então calculada a resistência R_1 através da 1ª Lei de Ohm.

$$i_F(t) = \begin{cases} i_{Fi}(m) + \frac{i_{Fi}(m+1) - i_{Fi}(m)}{v_{Fi}(m+1) - v_{Fi}(m)} \cdot \Delta v, \\ \text{if } v_{Fi}(m) < v_F(t) < v_{Fi}(m+1) \end{cases} \quad (2.3)$$

Onde:

$i_F(t)$ é o valor da corrente interpolada;

i_{Fi} e v_{Fi} são os valores de corrente e da tensão na tabela;

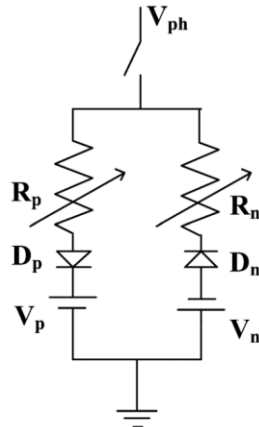
m é a posição correspondente na tabela;

$v_F(t)$ é a tensão medida no ponto de falta.

2.4.2 Modelo utilizando variação randômica (GAUTAM; BRAHMA, 2012)

O modelo utilizado por Gautam e Brahma (2012) é na verdade uma unificação de vários modelos, sendo uma evolução a partir do modelo mais simplificado, proposto por Emanuel et al. (1990) que utiliza dois diodos antiparalelo conectados a uma fonte de tensão contínua. A Figura 2.10 ilustra o modelo de FAI utilizado por Gautam (2012). Nesse modelo, as tensões V_p e V_n representam a tensão de ruptura do arco elétrico. Em sua modelagem, o autor utiliza valores de $V_p = 1\text{kV}$ e $V_n = 0,5\text{kV}$, com variação randômica de 10% em ambas. As resistências R_p e R_n representam a resistência do solo, no qual possuem uma variação randômica em torno de um valor, no trabalho de Gautam e Brahma (2012), esses valores são entre 100Ω e 150Ω para R_p e

Figura 2.10 – Modelo de FAI utilizando resistências aleatórias e diodos antiparalelo.



Fonte: (GAUTAM; BRAHMA, 2012).

R_n , respectivamente.

Outros trabalhos, como o de (KAVI; MISHRA; VILATHGAMUWA, 2018), também utilizam esse modelo com diferentes valores de V_p , V_n , R_p e R_n . Uma vez que uma FAI possui diferentes características para cada tipo de superfície, é considerado diferentes cenários variando estas variáveis propostas no modelo de Gautam e Brahma (2012). Apesar do modelo representar bem as características da FAI, não são previstos os períodos de *buildup* e *shoulder*.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo as principais características das FAI que ocorrem no SDEE foram apresentadas, seguida de um resumo das principais assinaturas que aparecem na forma de onda da corrente de FAI.

Os diferentes tipos de FAI, com ou sem rompimento de cabo, podem afetar os detectores de FAI devido a mudança no perfil de carga. Em casos de FAI com rompimento de condutor do lado da carga, pode não haver detecção da FAI ou então classificação errada da fase. Nesses casos, a utilização da corrente de neutro pode ser uma alternativa mais eficiente.

Os dois modelos de FAI descritos neste capítulo são amplamente utilizados na literatura. Devido a cada modelo possuir uma particularidade, por exemplo, o modelo de Gautam e Brahma (2012) não prevê *buildup* nem *shoulder* enquanto o modelo de Santos et al. (2013) não prevê variações randômicas ao longo do tempo, ambos os modelos serão utilizados na validação deste trabalho.

3 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FAI

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Métodos de detecção de FAI tem sua importância devido aos riscos que este tipo de falta gera. Com intuito de mitigar esses riscos e aprimorar técnicas existentes, vários algoritmos são propostos na literatura. Neste capítulo quatro algoritmos de detecção de FAI são descritos. Os métodos serão utilizados na análise comparativa.

3.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FAI

3.2.1 Método de Torres et al. (2014)

Torres et al., (2014) apresentaram um algoritmo baseado na taxa de distorção harmônica (THD) e componentes harmônicos, o qual contém nove etapas, conforme a seguir:

Etapa 1 – Medição das correntes de fase (valores instantâneos) no início do alimentador.

Etapa 2 – Cálculo dos componentes harmônicos pares de 2° até 8° ordem.

Etapa 3 – Cálculo dos componentes harmônicos ímpares de 3° até 9° ordem.

Etapa 4 – Para cada sinal de corrente é formado três grupos de sinais, isto é, somatório dos harmônicos pares, somatório dos harmônicos ímpares e 3° harmônico.

Etapa 5 – Aplica-se a condição

$$Se \left(\sum_{n=1}^H Ia_{(2n+1)} > Ia_3 > \sum_{n=1}^H Ia_{(2n)} \right) E \quad T_d > T - T_s$$

Onde:

H é o número de harmônicos considerado, tipicamente $H = 4$;

Ia é a corrente na fase A;

T_d é a temporização para o TRIP de FAI (200 ms);

T_s é o tempo que ocorreu a FAI, ou a primeira detecção.

Etapa 6 – Se a condição acima não for satisfeita, retorna-se a Etapa 1, caso contrário, segue-se para a próxima etapa.

Etapa 7 – Calcular a THD média (THDavg) nas três fases.

Etapa 8 – Aplica-se a condição:

$Se(THD_f > k * THD_{avg}) \rightarrow FAI \text{ detectada}$

Etapa 9 – Caso a condição da Etapa 8 for *verdadeira* a FAI é detectada, caso for *falsa* retorna a Etapa 1.

Onde:

THD_f é o THD da fase f em análise;

k é um coeficiente definido pelos autores (1,05).

Se o critério do passo 5 for *verdadeiro* e permanecer assim por mais de 200ms, uma FAI é suspeitada e o passo 8 irá discriminar através do coeficiente k se é uma FAI ou simplesmente cargas não lineares.

3.2.2 Método de Gautam e Brahma (2012)

O método proposto por Gautam e Brahma (2012) utiliza Morfologia Matemática (MM) para filtrar o sinal de tensão e então, extrair informações para detecção de FAI. Operações de MM são conhecidas e utilizadas em processamento de imagens, no entanto, nos últimos anos a técnica tem sido aplicada no processamento de sinais, especialmente na área de detecção de transitórios na área de proteção de SEP. A MM é fundamentada, basicamente, em duas operações conhecida por Dilatação e Erosão. Tais operações podem ser observadas nas Equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

$$y_d(n) = (f \oplus g)(n) = \max \left\{ \begin{array}{l} f(n-m) + g(m), \\ 0 \leq (n-m) \leq n, m \geq 0 \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

$$y_e(n) = (f \ominus g)(n) = \min \left\{ \begin{array}{l} f(n+m) - g(m), \\ 0 \leq (n+m) \leq n, m \geq 0 \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

Onde:

f é o sinal de entrada (em uma janela de dados);

g é o elemento estruturante, ou elemento transformador;

$y_d(n)$ e $y_e(n)$ são os valores dilatados e erodidos, respectivamente para cada amostra do sinal

f ;

n é a amostra a ser calculada;

m é a posição do vetor para o elemento g e também a posição na janela de f .

A partir das equações acima mencionadas, é possível compor outros operadores morfológicos como, por exemplo, a Abertura e o Fechamento, através das Equações (3.3) e (3.4), respectivamente.

$$y_A(n) = (f \circ g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (3.3)$$

$$y_F(n) = (f \bullet g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (3.4)$$

Utilizando os operadores de Abertura e Fechamento, elabora-se o filtro CODO (*Closing Opening Difference Operation*), que corresponde simplesmente a uma operação da diferença entre os operadores de Abertura e Fechamento. O operador CODO é dado pela Equação (3.5).

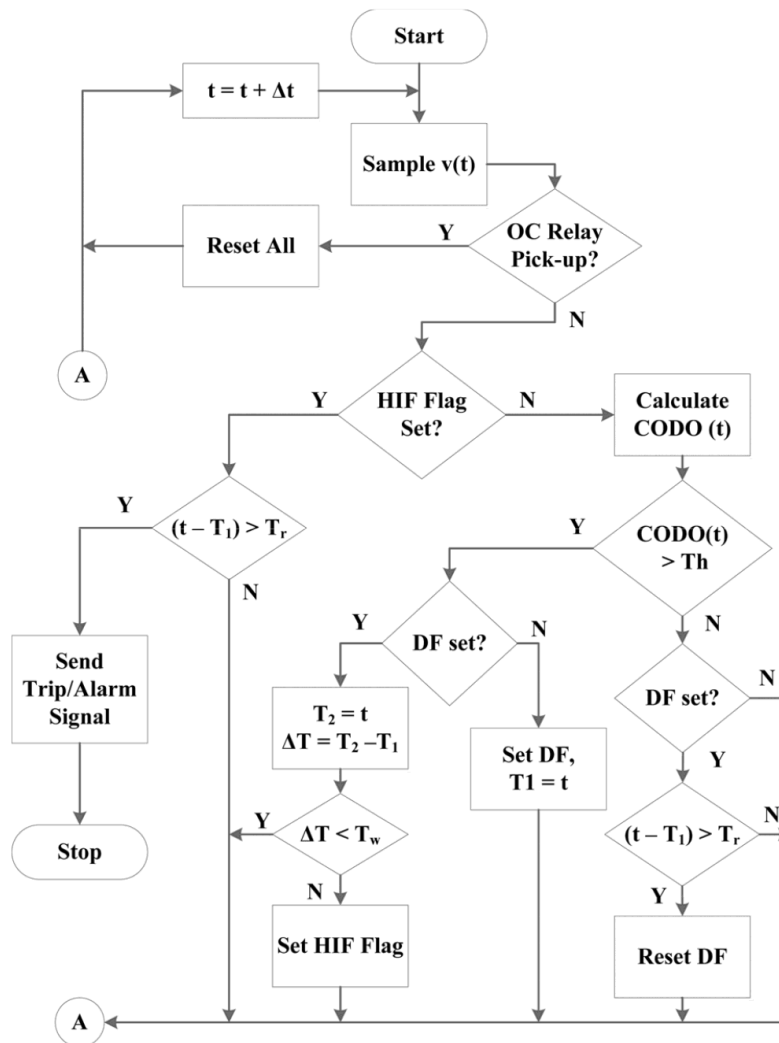
$$y_{CODO}(n) = y_F(n) - y_A(n) = (f \bullet g)(n) - (f \circ g)(n) \quad (3.5)$$

No algoritmo de detecção de FAI proposto por Gautam e Brahma (2012) o CODO é utilizado, como elemento fundamental para a detecção. Na Figura 3.1, o CODO é calculado caso não houver atuação da proteção convencional fundamentada em sobrecorrente.

Quando o valor de CODO ultrapassar um determinado limiar Th é definida a *flag DF*. A partir deste momento, caso houver outra amostra em que ultrapasse o Th , e o tempo seja maior que Tw , ocorre a detecção de FAI pela *flag HIF Flag*.

Neste algoritmo o autor utiliza um elemento estruturante (g) de tamanho 3 e com amplitude fixa de 0,01. Os sinais de corrente da rede devem estar normalizados antes de serem processados pelos operadores morfológicos. O valor de Th utilizado pelo autor é de 0,01.

Figura 3.1 – Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação de Gautam e Brahma (2012).



Fonte: (GAUTAM; BRAHMA, 2012)

3.2.3 Método de Lima (2016)

O método proposto por Lima (2016) utiliza medição de corrente de 2°, 3° e 5° harmônico para detecção de FAI junto com ângulo de fase do 3° harmônico. Para extração dos componentes harmônicos, é utilizado a STFT (do inglês *Short Time Fourier Transform*), que em sua composição, possui uma implementação computacional mais simples e é mais difundida que as outras transformadas (LIMA, 2016).

Para implementação em *hardware*, utiliza-se a forma discreta da STFT, computada conforme a Equação (3.6).

$$X_{STFT}[k, n] = \sum_{m=0}^{N-1} x[n+m] \omega[m] e^{\frac{-j2\pi km}{N}} \quad (3.6)$$

Onde:

$x[n]$ é o sinal no domínio do tempo;

N é o número de amostras;

ω é a função janela;

n o índice da amostra;

m o índice do somatório;

k as componentes de frequência.

A escolha da função janela (ω) é fundamental no desempenho da STFT. Para a aplicação de detecção de FAI, a autora define a janela de *Blackman-Harris* como sendo a mais apropriada, sendo parametrizada com tamanho de cinco ciclos.

A partir da STFT extrai-se os harmônicos desejados para cada uma das correntes de fase. O algoritmo de detecção proposto por Lima (2016) é mostrado no fluxograma da Figura 3.2.

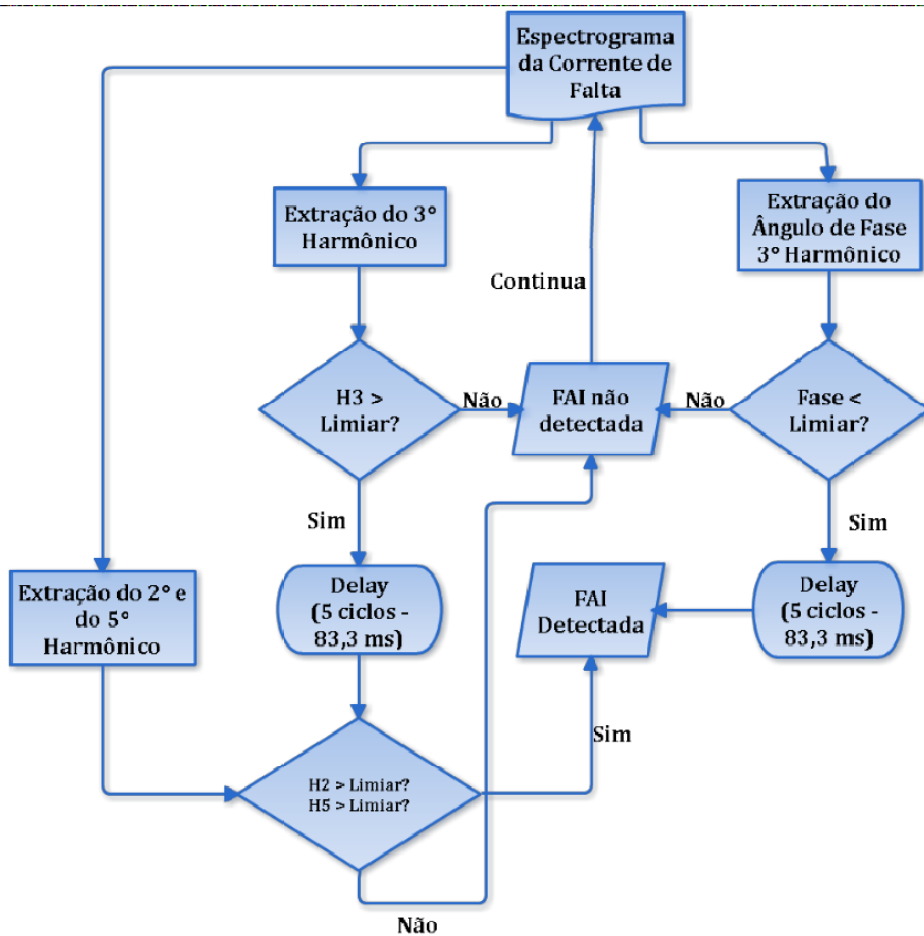
Caso haja harmônicos de 3ª ordem maior que determinado limiar (L_3), e estes permanecerem por mais de 5 ciclos de rede, é então verificado se os harmônicos de 2ª e 5ª ordem também estão acima de seus limiares previamente ajustados, (L_2) e (L_5) respectivamente. Em caso de *verdadeiro* ocorre a detecção de FAI.

Uma lógica baseada no ângulo de 3º harmônico funciona em paralelo. Se este ângulo permanecer abaixo de determinado limiar (L_ϕ) por mais de 5 ciclos, é então definido uma detecção de FAI.

Segundo Lima (2016), os valores dos limiares simulados computacionalmente se mostraram inadequados para casos reais de FAI que foram testados pela autora. Para solucionar o problema, uma média móvel de 20 amostras é implementada para cada harmônico, conforme a Equação (3.7). Na Tabela 3.1, é apresentado os valores adotados pela autora.

$$M_N = \sum_{i=1}^N \frac{x[i]}{N} \quad (3.7)$$

Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação proposto por Lima (2016).



Fonte: (LIMA et al., 2018)

Tabela 3.1 – Limiares adotados.

Simulados	Reais
$L_{\phi} = -200^{\circ}$	$L_{\phi} = M_{20} - 100^{\circ}$
$L_3 = -50 \text{ dB}$	$L_3 = M_{20} + 5$
$L_2 = -80 \text{ dB}$	$L_2 = M_{20} + 5$
$L_5 = -60 \text{ dB}$	$L_5 = M_{20} + 2$

Fonte: (LIMA, 2016)

Onde:

x é as amostras;

N o número total de amostras;

M é a média.

3.2.4 Método de Subramanian e Venkataraman (2012)

Subramanian e Venkataraman (2012) propuseram um método baseado em análise dos harmônicos na corrente de neutro. A principal diferença deste algoritmo é a utilização da corrente de neutro para detecção de FAI. No entanto, essa prática não é adequada para alguns tipos de SDEE, conforme mencionado no Capítulo 2.

A principal vantagem da utilização da corrente de neutro é que, dependendo do sistema, a corrente em condições normais será de pequena magnitude ou até mesmo bem próxima a zero. Sendo assim, quando ocorrer uma FAI, toda a corrente irá cruzar pelo neutro, ficando maior a proporção entre corrente oriunda da FAI e a corrente de carga. Inclusive, casos de FAI com rompimento de cabo no lado da carga são mais facilmente detectados pela corrente de neutro.

Em contrapartida, métodos que utilizam informação da corrente de neutro para a detecção necessitam de um classificador de fase, pois uma FAI identificada no neutro pode ter ocorrido em qualquer uma das fases.

No algoritmo proposto por Subramanian e Venkataraman (2012) é utilizado os seguintes critérios:

- 1) A amplitude da componente fundamental da corrente de neutro deve estar acima de um determinado limiar previamente definido (1A).
- 2) No neutro, a diferença entre o ângulo de 3° harmônico e a fundamental deve estar em uma região próxima à 180° (entre +120° e -120°).
- 3) A amplitude da corrente de 3° harmônico deve estar acima de um limiar previamente ajustado (3% da fundamental).
- 4) Se os três critérios acima são verdadeiros e isto permanecer por um determinado tempo (200ms), então há ocorrência de uma FAI.

Como os autores não mencionaram valores utilizados pelas condições acima, os valores dos limites apresentados foram adotados para a realização de testes comparativo. Estes valores foram definidos após uma série de testes com o algoritmo.

De modo a eliminar interferências de harmônicos que estão presentes na rede em regime permanente, é calculado um valor de incremento baseado em amostras médias. Uma janela de um ciclo mantém a forma de onda média atualizados na memória. Quando é percebido um novo ciclo de rede maior que a forma de onda média, é então calculado um vetor subtraindo a forma de onda média do novo ciclo de rede. Este vetor é então utilizado para extração dos harmônicos. No artigo, o autor não fala o tamanho da média.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados quatro algoritmos de detecção de FAI com características bem distintas. Um dos métodos utiliza a corrente de neutro para detecção; outro baseia-se na morfologia matemática; e os demais utilizam os componentes harmônicos das correntes de fases.

Os métodos apresentados neste capítulo serão avaliados através da metodologia de testes a ser apresentada no Capítulo 5. O desempenho de cada algoritmo será avaliado e discutido no Capítulo 6.

4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FAI

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

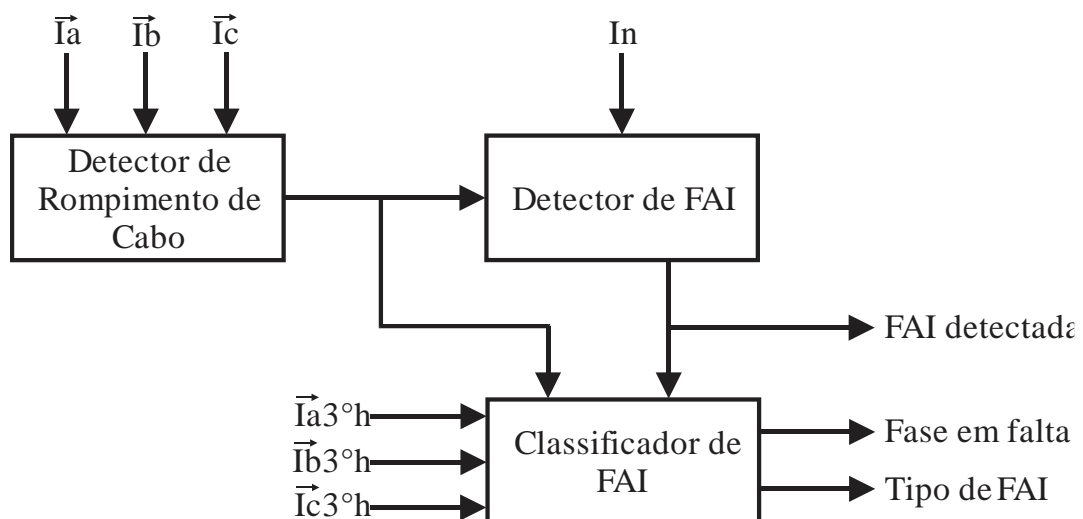
Neste capítulo será proposto um método de detecção e classificação de FAI. O método proposto, utiliza a corrente de neutro e as correntes de fase para tomada da decisão. A metodologia proposta também prevê a classificação do tipo de FAI (tema abordado na secção 2.3 deste trabalho). Dentre os quatro tipos de FAI que podem ocorrer, o algoritmo é capaz de distinguir três deles:

- Tipo S – Shunt;
- Tipo RLF – FAI no lado da fonte com rompimento de cabo;
- Tipo RLC – FAI no lado da carga com rompimento de cabo;

As faltas do tipo RLFC (rompimento com FAI no lado da fonte e da carga) são identificadas pelo algoritmo como sendo faltas do tipo RLF.

O fluxograma geral do método pode ser visualizado na Figura 4.1, onde são apresentados 3 blocos processadores: um bloco responsável pela detecção de FAI (Detector de FAI); outro bloco que realiza a classificação da fase e o tipo de FAI (Classificador de FAI); e também um bloco auxiliar que detecta se houve ou não rompimento de cabo no sistema (Detector de Rompimento de Cabo).

Figura 4.1 – Fluxograma do método proposto.



O bloco Detector de Rompimento de Cabo serve como rotina auxiliar na detecção e na classificação de FAI. Este detector de rompimento de cabo funciona em paralelo com o detector de FAI, o qual tem funcionalidade independente, ou seja, o detector de rompimento de cabo funciona de forma parcial na detecção de FAI. Já o bloco classificador apenas é executado caso tenha sido detectado uma FAI.

Como mostrado na Figura 4.1, o bloco detector de rompimento de cabo utiliza as informações dos fasores da componente fundamental das correntes de fase, enquanto o detector de FAI utiliza a corrente de neutro e a informação de cabo rompido proveniente do bloco anterior. Já o bloco classificador de FAI utiliza o fasor de 3ª harmônico da corrente de cada fase da informação de cabo rompido para realizar a identificação correta da fase sob falta e também do tipo de FAI.

4.2 DETECTOR DE ROMPIMENTO DE CABO

O algoritmo proposto tem por objetivo identificar quando ocorre um rompimento ou abertura de condutor em um sistema ou ramal trifásico. O método baseia-se na variação das componentes de sequência positiva e negativa da corrente do sistema, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 4.2.

Inicialmente, as componentes de sequência do sistema (Etapa 1) são calculadas a partir da transformada inversa de Fortescue (STEVENSON, 1974), conforme a Equação (4.1):

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{Ia} \\ \overline{Ib} \\ \overline{Ic} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

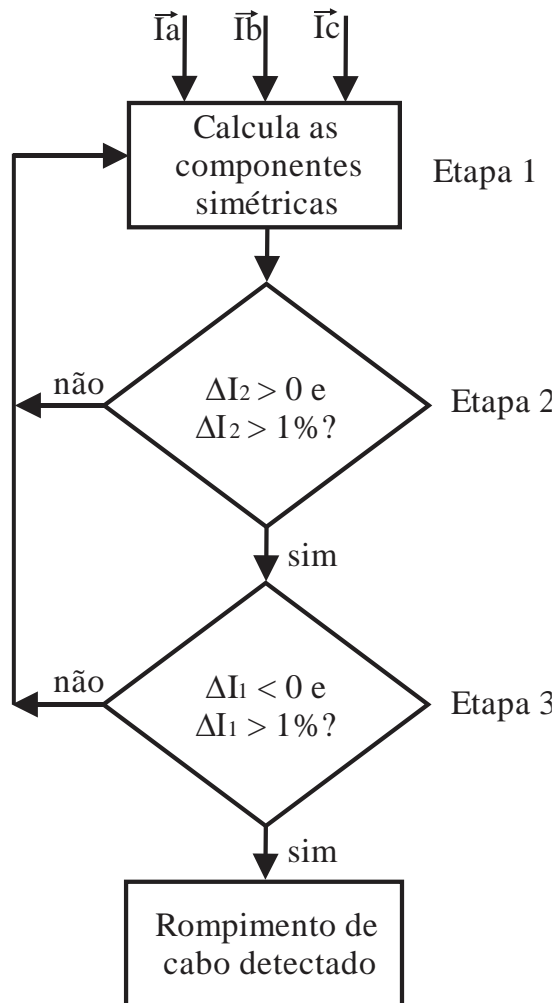
Onde:

$\overline{Ia}, \overline{Ib}$ e \overline{Ic} são os fasores da componente fundamental das correntes de fase do alimentador medidas na subestação e calculados a partir de uma FFT de ciclo completo;

I_0, I_1 e I_2 são as componentes de sequência zero, sequência positiva e sequência negativa, respectivamente.

Como um rompimento de cabo irá produzir uma alteração no desequilíbrio do sistema, a componente I_2 sofrerá uma variação (geralmente positiva em casos de rompimento de

Figura 4.2 – Fluxograma do algoritmo detector de rompimento de cabo.



Fonte: Autoria própria.

condutor). Assim, é monitorado a cada ciclo de rede a variação de I_2 (Etapa 2), de modo a identificar a variação na componente de sequência negativa do sistema, conforme a Equação (4.2):

$$\Delta I_2 = I_{2(n)} - I_{2(n-1)} \quad (4.2)$$

Onde:

ΔI_2 é a variação de I_2 entre a amostra atual e a amostra anterior, ou seja, a diferença da componente de sequência negativa entre um ciclo e outro;

n é a amostra.

Ainda na Etapa 2, a verificação se ΔI_2 é maior que zero se dá devido ao fato de um

aumento no desequilíbrio do sistema resultar em um aumento de I_2 . Já a restrição de 1% é apenas para filtrar pequenas oscilações de regime permanente pois o principal objetivo desta etapa é verificar se houve uma variação positiva de I_2 .

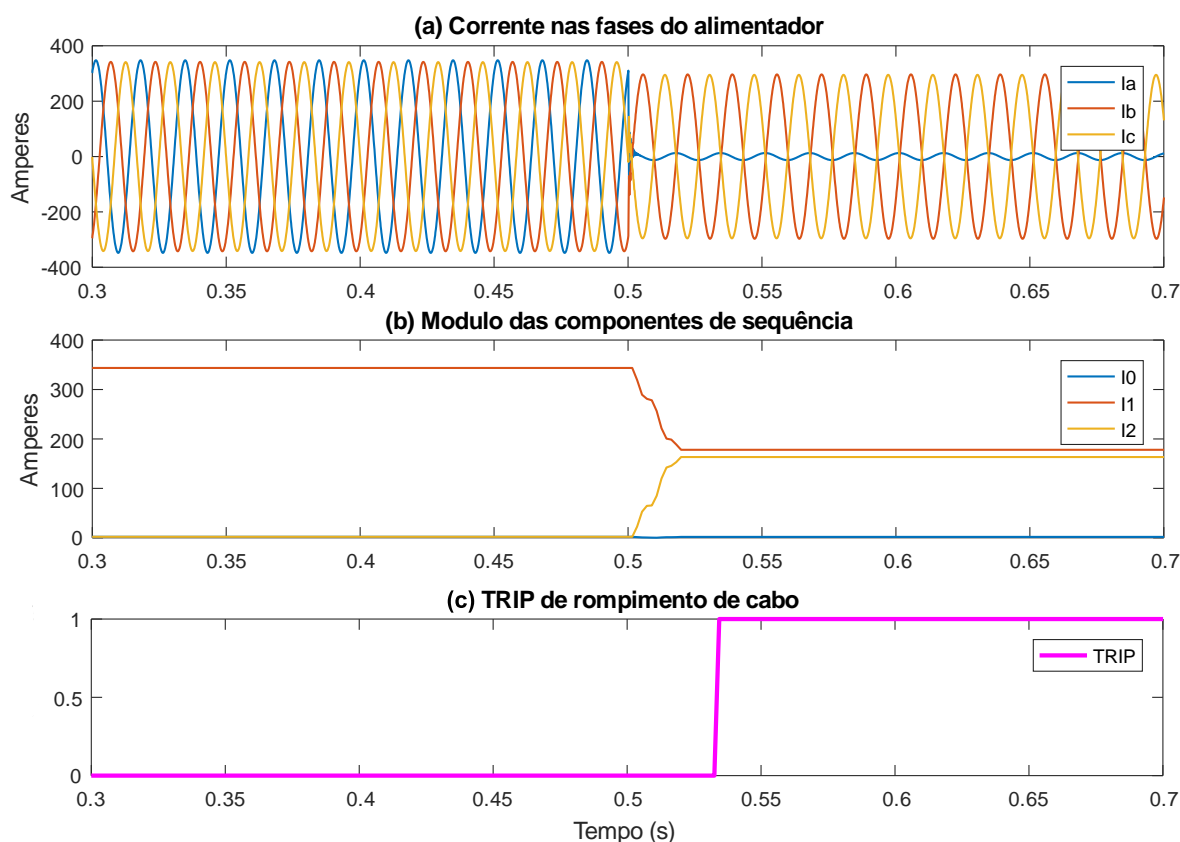
Caso a Etapa 2 seja *verdadeira*, é verificado a variação de I_1 (Etapa 3) pela Equação (4.3):

$$\Delta I_1 = I_{1(n)} - I_{1(n-1)} \quad (4.3)$$

Como há perda de carga em um rompimento de cabo, devido uma parcela da carga ficar comprometida e alimentada por apenas duas fases, é verificado se ΔI_1 sofre uma variação negativa e também se é maior que 1%. Essa verificação evita a detecção de rompimento de cabo indevida para qualquer entrada de carga que desequilibre o sistema.

Para exemplificar o funcionamento do algoritmo, a Figura 4.3 mostra a simulação de um rompimento de cabo. A Figura 4.3 (a) mostra o comportamento das correntes de fase, a Figura 4.3 (b) mostra a resposta das componentes de sequência zero, negativa e positiva. No instante 0,5s do tempo, ocorre a ruptura do condutor na fase “A”, em seguida, I_1 sofre uma redução devido à perda de carga, enquanto I_2 sofre uma variação positiva devido ao desequilíbrio causado pelo rompimento do cabo. Na Figura 4.3(c) é mostrado o sinal de identificação de cabo rompido pelo algoritmo. Esta informação é então enviada ao detector de FAI para servir como uma variável auxiliar na detecção de FAI, caso não seja detectada a FAI dentro de 10 segundos, o TRIP do detector de rompimento de cabo é resetado para zero novamente.

Figura 4.3 – Comportamento das componentes simétricas para um rompimento de cabo.



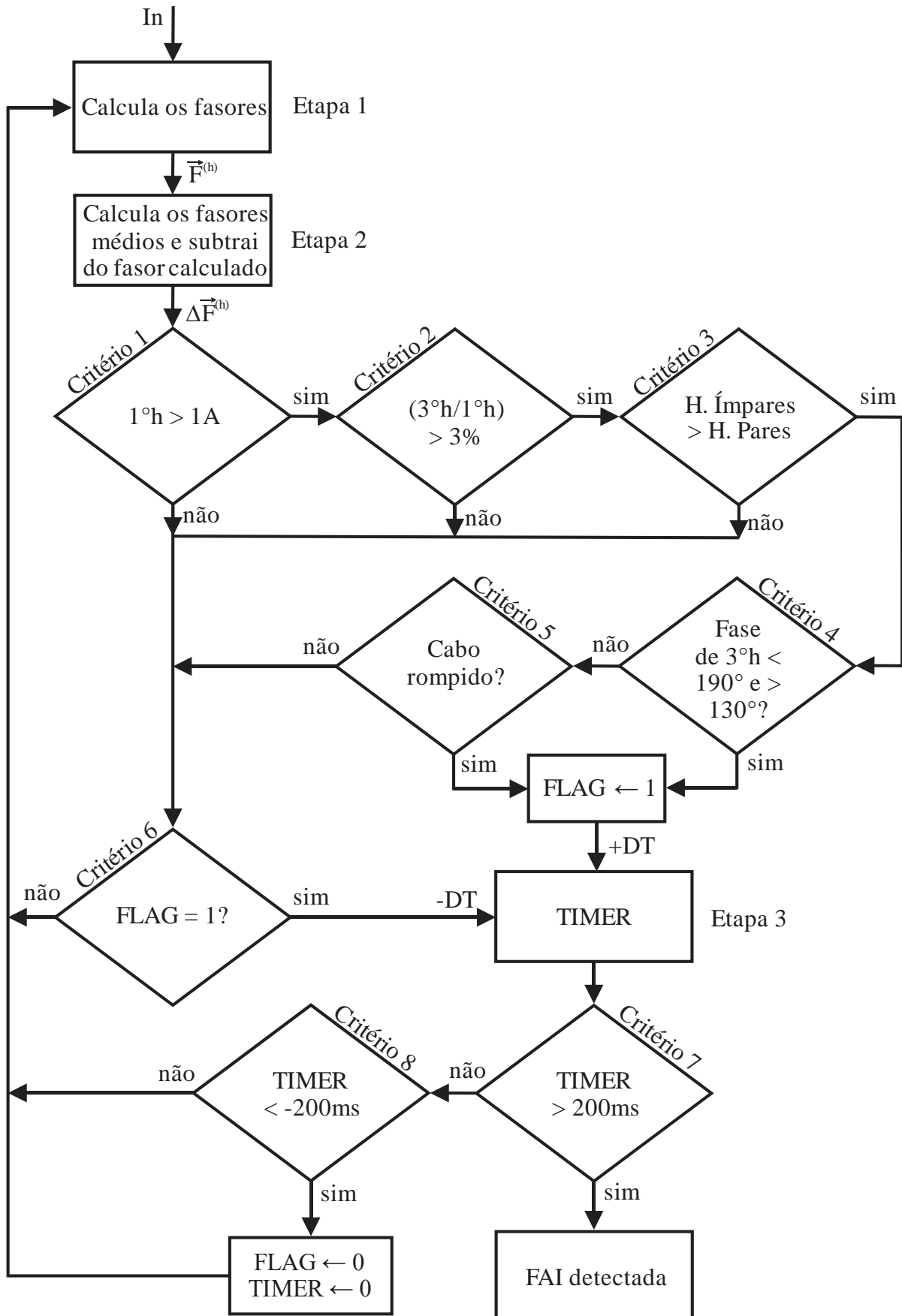
Fonte: Autoria própria.

4.3 ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FAI

O algoritmo de detecção de FAI desenvolvido é fundamentado na análise harmônica da corrente de neutro do alimentador. O fluxograma da Figura 4.4 mostra o processo utilizado pelo algoritmo para detectar uma FAI, o procedimento é descrito pelas seguintes Etapas e Critérios:

- Etapa 1) A partir de uma FFT de ciclo completo é calculado os fasores da corrente de neutro (módulo e ângulo), usando como referência angular a tensão V_a , dos harmônicos de 1^a até a 7^a ordem. No fluxograma, $\vec{F}^{(h)}$ é a representação dos fasores para cada componente harmônica h .
- Etapa 2) Neste bloco é calculado uma média móvel ponderada do fasor de cada componente harmônico dada pela Equação (4.4):

Figura 4.4 – Fluxograma do algoritmo de detecção de FAI.



Fonte: Autoria própria.

$$\overline{FM}_{(n)}^{(h)} = \frac{\overline{F}_{(n)}^{(h)} + P \times \overline{FM}_{(n-1)}^{(h)}}{P+1} \quad (4.4)$$

Onde:

\overline{F} é o fasor calculado pela FFT na amostra atual;

h é a componente harmônica correspondente ao fasor;

P é o peso da amostra;

n é a amostra atual;

\overline{FM} é o fasor médio calculado.

É importante ressaltar que a Equação (4.4) não é uma equação genérica de média móvel ponderada, e sim a equação resultante para duas amostras, onde a primeira amostra é o fasor calculado e a segunda amostra é o fasor médio calculado na amostra anterior. Essa solução foi escolhida por ser de fácil implementação para aplicações em tempo real, uma vez que não necessita muito processamento e grande uso de memória.

Os valores adotados para a variável P definem o tempo de resposta da média. Para os testes realizados, foi utilizado um valor correspondente a 10 ciclos de rede em 60Hz, ou seja, se cada amostra n representar 1 ciclo de rede, então $P=10$. Caso o algoritmo seja executado 4 vezes a cada ciclo de rede, por exemplo, então $P=4 \times 10=40$.

Ainda na Etapa 2, após calcular \overline{FM} , se aplica a Equação (4.5) para extrair a diferença entre o fasor medido e o fasor médio:

$$\Delta \overline{F}_{(n)}^{(h)} = \overline{F}_{(n)}^{(h)} - \overline{FM}_{(n-1)}^{(h)} \quad (4.5)$$

O fasor resultante $\Delta \overline{F}^{(h)}$ (para cada componente harmônica) é então utilizado nas as próximas etapas e critérios do algoritmo. Esse procedimento é importante por que remove os componentes harmônicos presente na rede em regime permanente, ou seja, quando há uma mudança na corrente de neutro e em seus componentes harmônicos, $\Delta \overline{F}^{(h)}$ representa apenas os valores adicionais.

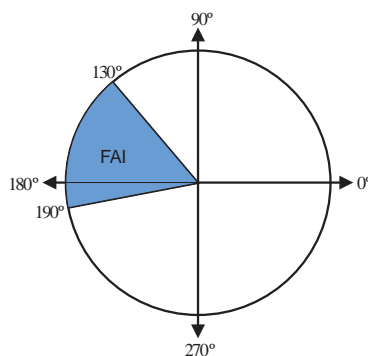
- Critério 1) Neste primeiro critério é monitorado a magnitude da componente fundamental (1ºh). Caso haja uma variação maior que 1 A, o algoritmo passa para os próximos critérios que avaliam se o incremento $\Delta \overline{F}^{(h)}$ é causado por uma FAI. Este critério, caso *verdadeiro*, é também utilizado para manter o valor do fasor médio

calculado na Equação (4.4), ou seja, se o Critério 1 for *verdadeiro*, nas próximas amostras não será calculado \overline{FM} , isto faz com que as próximas medidas que são calculadas pela Equação (4.5) sejam referentes a um fasor médio correspondente ao um valor pré-falta. A variável \overline{FM} permanece inalterada por 1 segundo ou até que a FLAG retorne para o valor zero. Esta FLAG (indicada na Figura 4.4) caso *verdadeira*, representa o início de um processo de detecção de FAI.

- Critério 2) Após o Critério 1 ter identificado um aumento na componente fundamental da corrente de neutro, é então verificado o percentual de terceiro harmônico em relação a componente fundamental ($3^{\circ}h/1^{\circ}h$). Segundo Liu et al.(2016), a corrente de terceiro harmônico em uma FAI possui entre 5 e 30% de seu valor total. Porém em simulações computacionais realizadas com os modelos de FAI em análise, percebeu que alguns tipos de solos possuem um percentual abaixo de 5% dependendo do tipo de FAI que foi aplicado, devido a isto, utilizou-se 3% como limiar. A avaliação do 3° harmônico tem importância devido ser a principal característica das FAI. Os próximos critérios têm como objetivo distinguir a FAI de outros eventos.
- Critério 3) Neste ponto, é comparado se a soma do módulo dos harmônicos ímpares (3° , 5° e 7°) é maior que a soma do módulo dos harmônicos pares (2° , 4° e 6°). Esta condição impede a atuação indevida do algoritmo em casos onde há um chaveamento monofásico de um transformador. Esta condição foi estabelecida após perceber-se em simulações de FAI e também de chaveamento de transformadores (considerando a saturação) que os harmônicos ímpares são mais significativos em casos de FAI e que os harmônicos pares são mais evidentes no chaveamento de transformadores.
- Critério 4) Neste critério é analisado o ângulo do terceiro harmônico (o qual está referenciado em relação a tensão da fase “A” da rede). Caso este ângulo seja menor que 190° e maior que 130° é então estabelecido o valor 1 para a variável FLAG, ou seja, todos os critérios para a detecção de FAI foram verificados como *verdadeiros* e é iniciado uma contagem incrementando DT ao TIMER (DT é o tempo entre as amostras, ou seja, o intervalo entre as execuções do algoritmo). A Figura 4.5 mostra de forma visual a janela angular onde o Critério 4 se estabelece como *verdadeiro*. Esta janela angular foi escolhida através de análises das simulações de FAI. Teoricamente uma FAI possui um ângulo de terceiro harmônico próximo de 180° (LIU et al., 2016), porém como o ângulo de referência é a tensão da fase “A” (pode ser usado qualquer uma das fases como referência que os valores permaneceriam os mesmos devido ao terceiro

harmônico fazer parte da sequência zero), a janela angular (em azul) da Figura 4.5 acaba sendo não centrada em 180° devido a tensão no ponto de falta ser levemente defasada da tensão na subestação, isto ocorre devido as cargas no alimentador serem normalmente do tipo indutivas.

Figura 4.5 - Abertura angular do 3° harmônico estabelecida para detecção de FAI.



Fonte: Autoria própria.

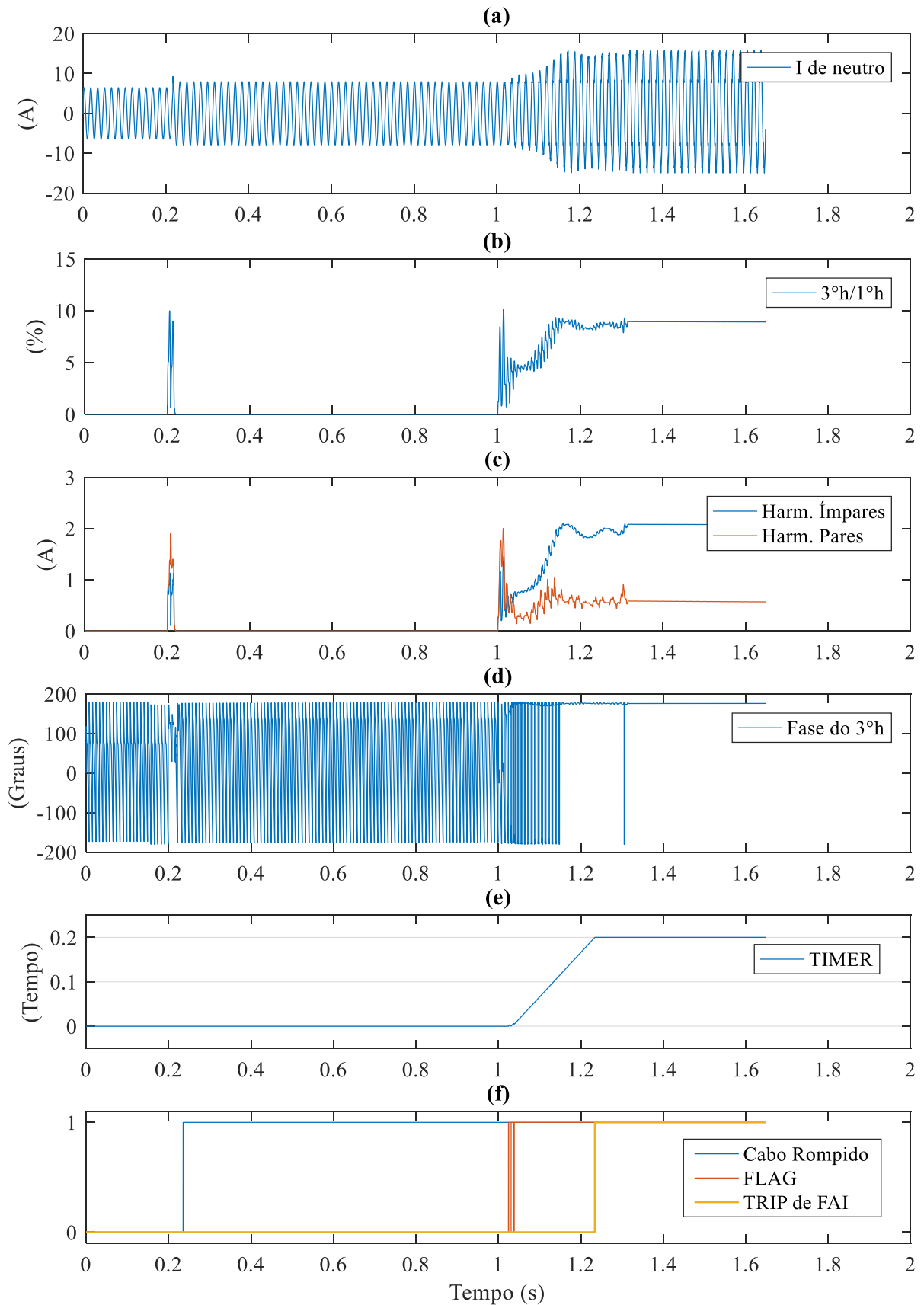
- Critério 5) Em casos de FAI com rompimento de cabo, o ângulo de 3° harmônico pode ficar em uma posição não coerente com o Critério 4. Assim é analisado se ocorreu um rompimento de cabo (informação proveniente do algoritmo descrito na subsecção anterior), caso *verdadeiro*, é então iniciado o processo de incremento de DT ao TIMER.
- Critério 6) Este critério é aplicado caso um dos Critérios 1, 2 e 3 sejam *falsos* ou então, caso os Critérios 4 e 5 forem ambos *falsos*, ou seja, o Critério 6 é analisado quando $\Delta \bar{F}^{(h)}$ não corresponde a uma FAI para aquela amostra n em análise. Neste ponto é verificado se o algoritmo está em um processo de contagem do TIMER (FLAG=1), caso afirmativo, é decrementado DT do TIMER, caso contrário, retoma a etapa 1.
- Etapa 3) Nesta etapa é apenas realizado o incremento ou decremento do TIMER conforme as condições anteriormente citadas. É importante notar que o incremento do TIMER é efetuado dinamicamente, de forma que seja apenas considerado o somatório do tempo em que as condições de FAI se mostraram *verdadeiras*. Essa forma de incremento evita que o TIMER seja zerado na primeira vez que os critérios não mostram características de uma FAI. Também é importante ressaltar que o TIMER começa de zero e será decrementado para valores negativos caso a análise dos critérios anteriores resulte em um não condição de FAI.
- Critério 7) Após passar pela Etapa 3, é verificado se o TIMER é maior que 200ms, caso *verdadeiro*, ocorre então a detecção da FAI. O tempo de contagem estabelecido (200ms)

irá impedir que alguns eventos transitórios na rede (como chaveamento monofásico de capacitor e outros transitórios contendo terceiro harmônico) não indiquem uma detecção indevida de FAI.

- Critério 8) Caso o TIMER não tenha atingido o tempo de 200ms no critério 7, é então verificado se ele não possui um valor menor que -200ms. Caso não possua, o algoritmo retoma a Etapa 1 e prossegue para a próxima execução. Caso *verdadeiro*, o TIMER e a FLAG são zerados e o algoritmo retoma a Etapa 1, este caso indica que não houve detecção de FAI, ou seja, ocorreu outro evento que disparou a FLAG, no entanto não se caracterizou como uma FAI.

Para exemplificar o funcionamento do algoritmo, a Figura 4.6 mostra o que ocorre com algumas variáveis durante a ocorrência de uma FAI. Na Figura 4.6, é mostrado em (a) a corrente de neutro, onde no instante 0,2s o cabo rompe e no instante 1s se estabelece o contato do cabo ao solo. No instante 0,2s é então detectado um rompimento de cabo pelo algoritmo apresentado na seção anterior, o sinal de cabo rompido pode ser visto em (f) logo após o instante 0,2s. Ao iniciar a FAI em 1s, a porcentagem de terceiro harmônico, verificada no Critério 2, começa a aumentar como pode ser visto em (b). Após atingir 3%, o algoritmo passa para o Critério 3, onde em (c) pode ser visualizado a soma dos harmônicos pares e ímpares. Nota-se que logo após a ocorrência da FAI, os harmônicos ímpares se destacam, levando o algoritmo ao próximo Critério. Em (d) é mostrado o ângulo do terceiro harmônico, o qual se mantém próximo de 180° após o início da FAI, o que leva a FLAG para 1, onde pode ser visualizada em (f). Assim, o algoritmo começa a incrementar o TIMER, como mostrado em (e), enquanto as Critérios 1, 2, 3 e 4 são verdadeiros, até que TIMER atinja 200ms, indicando a ocorrência da FAI (sinal em amarelo em (f)). O Critério 5, que é a análise de cabo rompido, somente é verificado caso o Critério 4 seja *falso*, onde neste caso não é necessário.

Figura 4.6 – Comportamento das variáveis do algoritmo para a ocorrência de uma FAI. Em a) a corrente de neutro; b) a porcentagem de 3º harmônico; c) somatórios dos harmônicos pares e ímpares; d) ângulo de terceiro harmônico; e) tempo do TIMER; e f) respostas do algoritmo.



Fonte: Autoria própria.

4.4 ALGORITMO DE CLASSIFICAÇÃO DE FAI

A função do classificador de FAI proposto é identificar a fase sob FAI e também o tipo de FAI, de acordo com o que foi apresentado no Capítulo 2, seção 2.3. Após observações de simulações de diferentes tipos de FAI, constatou-se que o ângulo dos fasores de terceiro harmônico nas fases sãs é muito similar. No entanto, existe uma diferença considerável quando compararmos o ângulo do fasor de terceiro harmônico da fase com FAI com as outras duas fases. A diferença irá depender do tipo de FAI. Outra constatação foi que a amplitude do terceiro harmônico (assim como os demais harmônicos) é maior na fase sob FAI para os tipos S e RLF, e praticamente inexistente para o Tipo RLC. Baseado nesses fatores, desenvolveu-se um algoritmo para classificar a fase e o tipo de FAI.

A Figura 4.7 ilustra o fluxograma do classificador de FAI proposto. O primeiro processo (Etapa 1), muito importante em aplicações práticas, é o cálculo da média móvel ponderada do fasor de terceiro harmônico, conforme a Equação (4.4). O valor de P utilizado é correspondente a 1 ciclo de rede em 60Hz. A função da média móvel é o amortecimento de pequenas oscilações, evitando as classificações errôneas. Este valor médio é então utilizado no algoritmo ao invés do valor calculado.

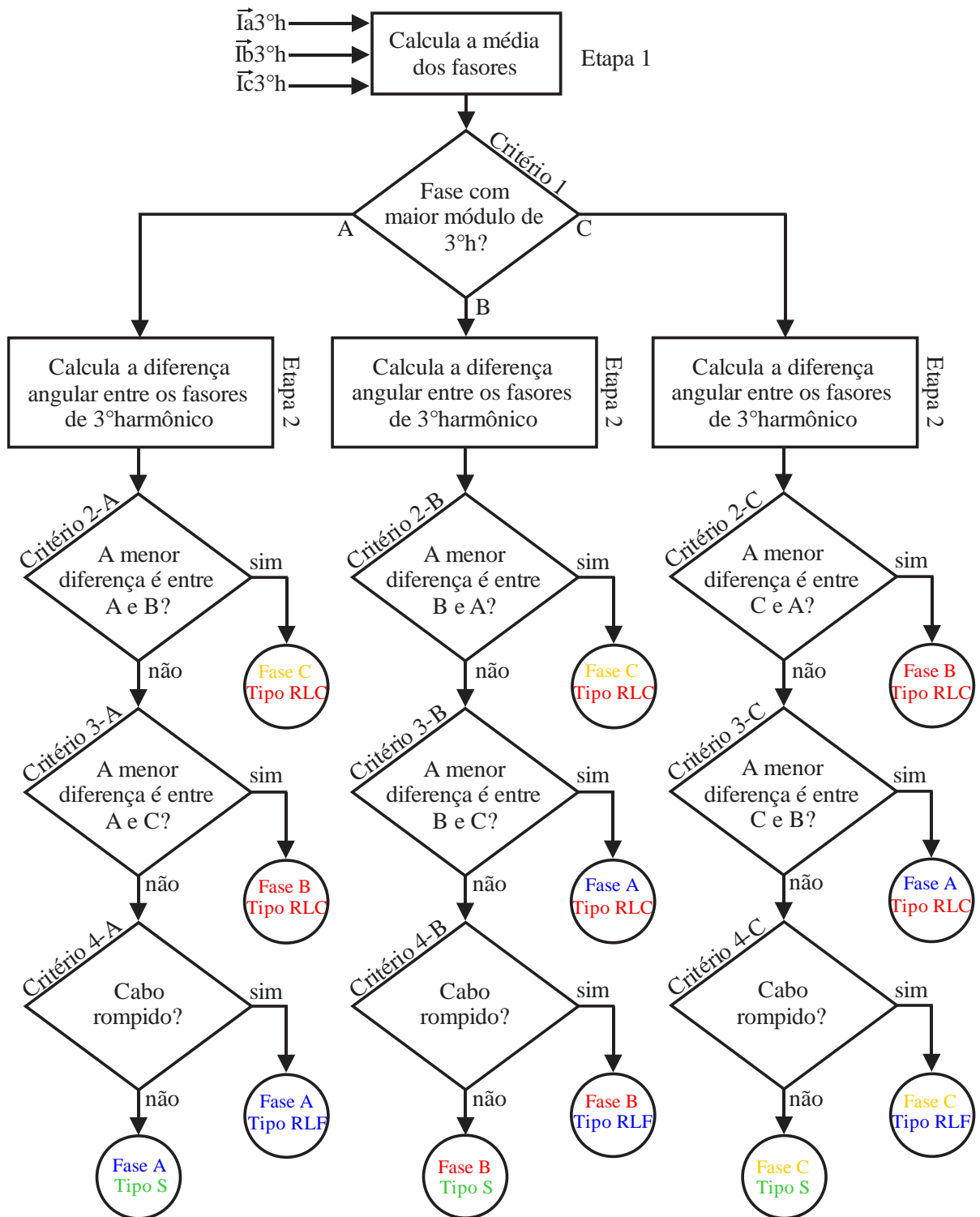
Em seguida (Critério 1) é avaliado qual das fases possui o maior módulo de terceiro harmônico. Avaliando este critério o algoritmo prossegue em uma das três colunas mostradas no fluxograma. É importante ressaltar que este critério ainda não define a fase em defeito. A resposta da fase e do tipo de FAI são apresentadas nos círculos do fluxograma e irá depender das próximas etapas e critérios do algoritmo.

Na Etapa 2 é realizado o cálculo do módulo da distância angular entre os fasores de terceiro harmônico. Com este cálculo se obtêm três valores de ângulo, isto é, diferença angular entre os fasores das fases “A” e “B”; diferença angular entre os fasores das fases “B” e “C”; e a diferença angular entre os fasores das fases “C” e “A”, calculados pelas Equações (4.6), (4.7) e (4.8), respectivamente:

$$\Delta AF^{AB} = \left| \overset{A}{AF} - \overset{B}{AF} \right| \quad (4.6)$$

$$\Delta AF^{BC} = \left| \overset{B}{AF} - \overset{C}{AF} \right| \quad (4.7)$$

Figura 4.7 – Fluxograma do algoritmo classificador de FAI.



Fonte: Autoria própria.

$$\Delta AF^{CA} = \left| AF^C - AF^A \right| \quad (4.8)$$

Onde:

AF^C é o ângulo do fasor de terceiro harmônico correspondente a fase indicada acima de AF^C ;

ΔAF é o módulo da diferença angular entre os fasores.

É importante ressaltar que para o cálculo de ΔAF é apenas utilizado o ângulo do fasor, ou seja, a amplitude de terceiro harmônico não tem interferência nesta etapa. Assim, sabendo qual das três equações acima possui o menor valor, já se pode afirmar que tal valor corresponde a diferença angular entre as fases sãs, uma vez que as fases sãs possuem um fasor de terceiro harmônico similar quando comparados com a fase em falta.

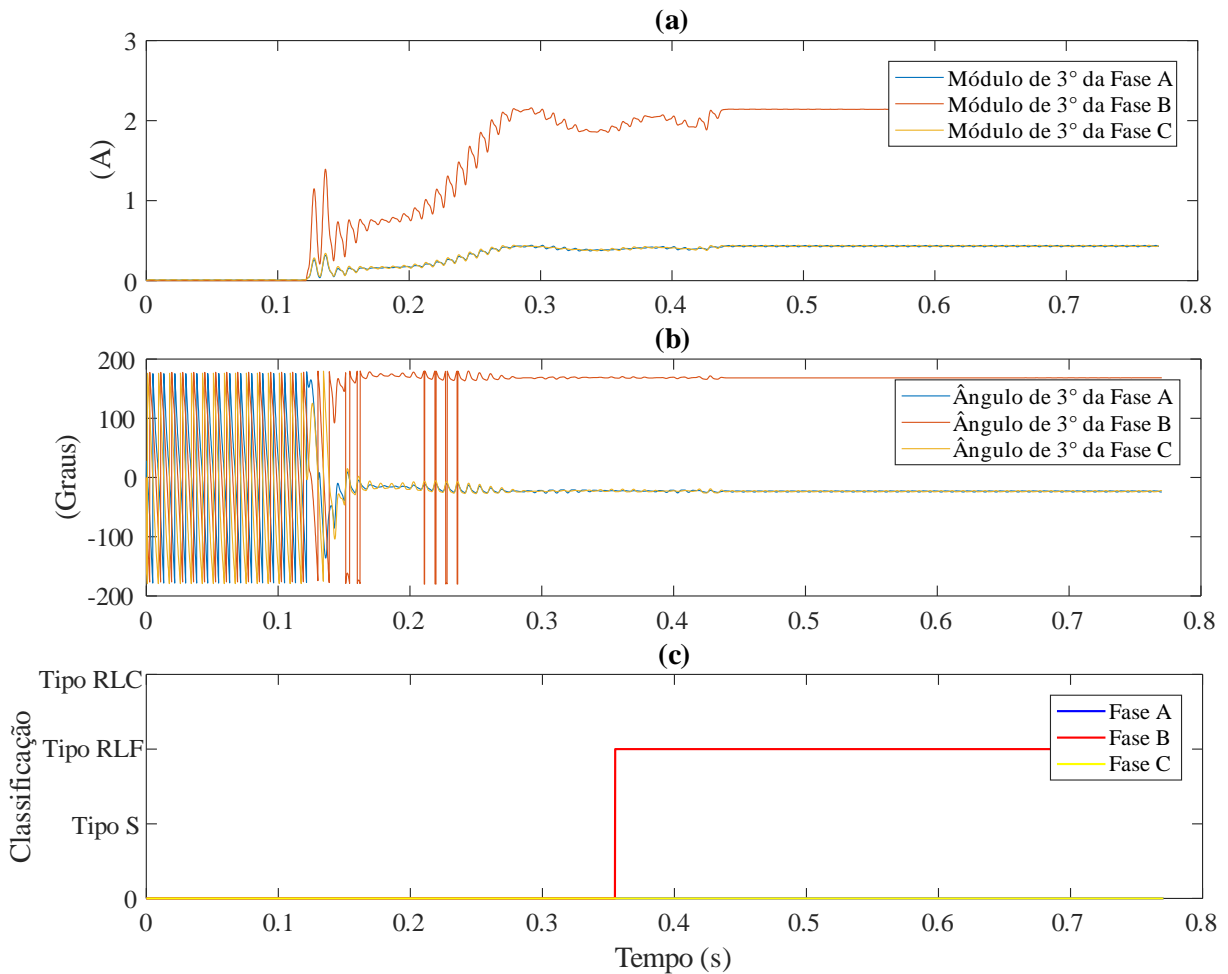
Deste modo, os Critérios 2 e 3 verificam se a fase correspondente a coluna selecionada pelo Critério 1 faz parte das fases sãs, caso afirmativo, significa que a ocorrência da FAI corresponde a uma classificação do Tipo RLC, pois a fase com maior amplitude de terceiro harmônico (selecionada pelo critério 1) corresponde a uma das fases sãs e portanto não pode ser uma FAI do Tipo S ou Tipo RLF.

Caso o Critério 4 seja alcançado, ou seja, o Critério 3 seja *falso*, então significa que a menor diferença angular está entre as fases oposta a coluna selecionada pelo Critério 1. Portanto, a fase em falta corresponde a fase selecionada pelo Critério 1. Já a distinção entre FAI do Tipo S e Tipo RLF se dá através da análise do cabo rompido (informação proveniente do algoritmo detector de rompimento de cabo).

A Figura 4.8 mostra o comportamento do terceiro harmônico nas três fases para um caso de FAI do Tipo RLFC na fase “B”. Para este caso, o algoritmo classificador identifica a fase “B” como sendo a fase com maior amplitude de terceiro harmônico, na Figura 4.8 (a) é mostrado a amplitude de terceiro harmônico. Assim, o algoritmo percorre a coluna no meio, mostrada na Figura 4.7. Analisando a Figura 4.8 (b), onde é mostrado o ângulo de terceiro harmônico para as três fases, percebe-se que os ângulos dos fasores das fases “A” e “C” estão muito próximos, o que torna os Critérios 2-B e 3-B *falsos*. Desta forma, o algoritmo analisa o Critério 4-B, o qual é *verdadeiro* devido a ser identificado um rompimento de cabo anteriormente, levando a saída do classificador para Tipo RLF e Fase “B”, o que pode ser visto na Figura 4.8 (c), onde a saída da classificação é apresentada.

Como mencionado anteriormente, o algoritmo não é capaz de identificar FAI do Tipo RLFC. Nestes casos, a resposta do classificador será FAI do Tipo RLF devido sua similaridade.

Figura 4.8 – Comportamento do módulo de terceiro harmônico nas três fases em (a); comportamento do ângulo do terceiro harmônico nas três fases em (b); e a saída do classificador em (c).



Fonte: Autoria própria.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a principal contribuição deste trabalho, isto é, um detector de FAI. A metodologia é composta por três blocos distintos: detector de rompimento de cabo; detector de FAI; e classificador de FAI. O método proposto para detecção de rompimento de cabo é baseado na variação das componentes de sequência. Já o método para detecção de FAI utiliza o módulo e o ângulo de terceiro harmônico como sendo a principal característica para identificar a presença de FAI na rede. Na etapa de classificação de FAI, o módulo e o ângulo de terceiro harmônico são analisados para verificar o tipo de FAI ocorrido.

5 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A maioria dos algoritmos propostos na literatura, nas mais diversas aplicações em SEP, são apenas testados e validados através simulações computacionais em modo *offline*, isto é, o comportamento dos algoritmos não é avaliado em tempo real. No entanto, atualmente, os simuladores em tempo real, do inglês *Real Time Simulators* (RTS), estão permitindo trazer parte da simulação em tempo real para o meio físico, ou seja, transformam sinais computacionais em variáveis de tensão e corrente reais. Estes simuladores têm o propósito de testar e validar sistemas em tempo real.

A implementação de algoritmos em um *hardware* ou microprocessadores possui uma grande relevância no aspecto de validação de tais algoritmos visando aplicação em campo. Isso ocorre devido ao fato de muitos algoritmos nem sempre serem passíveis de implementação em tempo real por motivos diversos, tais como, necessidade de alta taxa amostragem, complexidade das funções matemáticas, etc. Assim, visando avaliar o algoritmo desenvolvido neste trabalho, bem como, com compará-lo com outros métodos, este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos para a implementação em *hardware* do algoritmo de detecção e classificação de FAI proposto e também das outras metodologias.

5.2 AMBIENTE DE TESTES EM *HARDWARE-IN-THE-LOOP*(HIL)

Para realizar testes de algoritmos junto a um RTS, existem três opções mais típicas:

i) SIL – *software in the loop*, que executa a simulação em tempo real tanto do sistema elétrico, quanto do algoritmo ou modelo objeto de estudo, diretamente no simulador. Neste tipo de simulação não há *hardware* externo conectado nas saídas analógicas ou digitais do simulador. Este tipo de simulação normalmente visa a correção de *bugs* no código do algoritmo quando executados em tempo real;

ii) HIL – *hardware in the loop*, que é a simulação em tempo real do sistema elétrico executada no simulador, sendo este conectado externamente através de alguma saída analógica (sinais de baixa magnitude) ou digital a um *hardware* a ser testado, conhecido por DUT (do inglês *device under test*) (BÉLANGER; VENNE; PAQUIN, 2010). Na simulação em HIL o

DUT executa o algoritmo ou modelo a ser estudado utilizando dados, analógicos ou digitais, provenientes do simulador. O termo *Loop* se refere ao fato que DUT ainda deve interagir com a simulação, retornando algum sinal para o simulador. Por exemplo, enviando um sinal para comandar a abertura/fechamento de um disjuntor da simulação. Como a simulação está em malha fechada, este tipo de teste permite realizar ensaios em ambiente seguro, analisando o efeito do DUT quando conectado ao sistema elétrico. A metodologia de teste utilizada nesta dissertação é do tipo HIL;

iii) PHIL – *power hardware-in-the-loop* – representa uma extensão natural da simulação e HIL. Porém, neste tipo de teste são utilizados amplificadores de alta potência entre o simulador e o DUT. Desta forma, os sinais de baixa magnitude, das saídas analógicas do simulador, são amplificados e enviadas ao DUT.

5.2.1 Simulador em Tempo Real da OPAL-RT

Para a realização das simulações em HIL foi utilizado o RTS da OPAL-RT, modelo OP5700. Algumas características em termos técnicos do OP5700 são:

- 16 canais de saída analógica com resolução de 16 bits e amplitude de até $\pm 16V$;
- 16 canais de entrada analógica com resolução de 16bits e amplitude de até $\pm 20V$;
- 32 canais de saída digital com isolamento ótica;
- 32 canais de entrada digital com isolamento ótica;
- Processador INTEL XEON 8 núcleos 3,2GHz;
- 16GB de memória RAM.

A Figura 5.1 mostra uma foto do equipamento utilizado, o qual pertence a Universidade Federal de Santa Maria. Na Figura 5.2 é mostrado uma vista da parte de trás do equipamento, onde estão os I/O (entradas/saídas analógicas/digitais) para interação com o DUT.

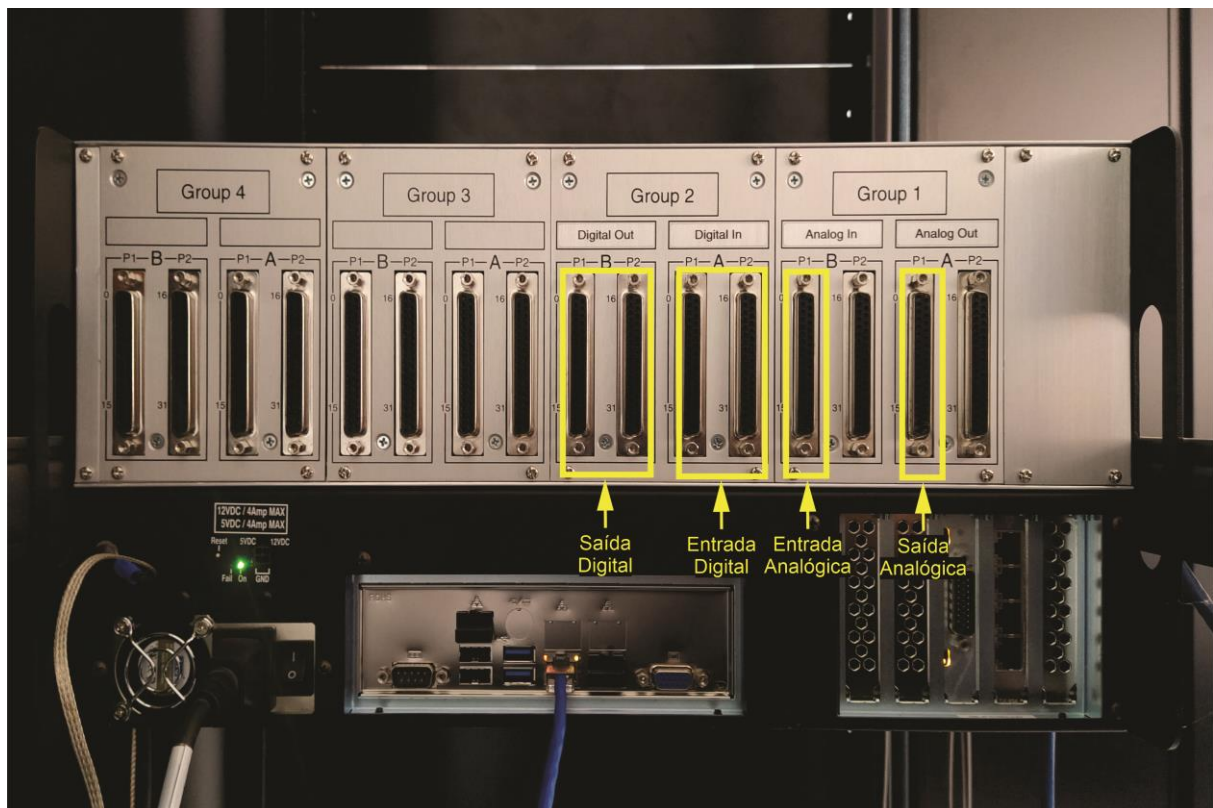
Na parte de trás do simulador, cada grupo de sinais possui uma determinada configuração de pinagem, que também pode ser acessada na parte frontal do equipamento para fins de visualização. Na parte de trás a conexão é feita através de um conector DB37 e na parte frontal por meio de um cabo RJ45 e Mini-BNC que é muito utilizado em osciloscópios.

Figura 5.1 – Equipamento RTS utilizado em testes de HIL: OP5700.



Fonte: Autoria própria.

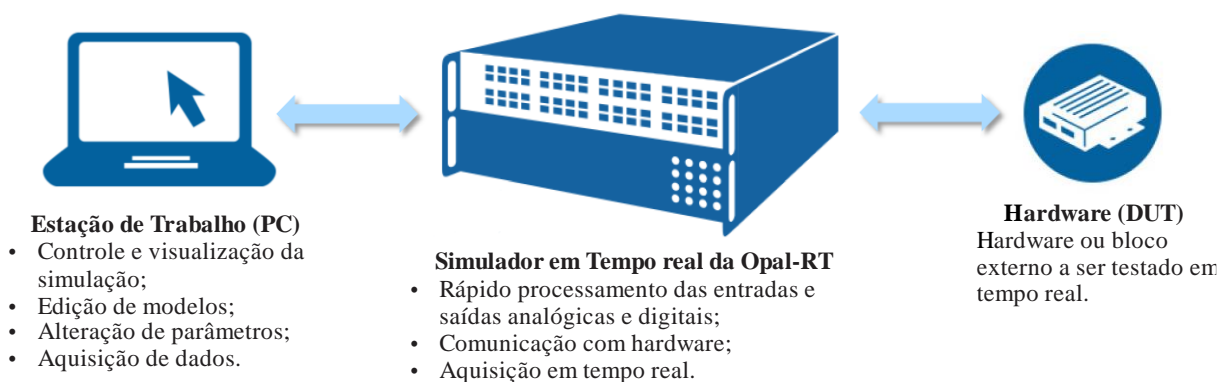
Figura 5.2 – Conectores posteriores do OPAL para comunicação com o mundo real.



Fonte: Autoria própria.

O procedimento metodológico de testes em HIL é ilustrado na Figura 5.3, onde é mostrado a interação entre os elementos envolvidos. O OP5700, elemento central da figura, faz o processamento em tempo real do sistema teste, além de interagir com o DUT (*hardware* com algoritmo de detecção de FAI a ser testado). Esta interação com o *hardware* se dá através dos canais das entradas e saídas analógicas e digitais (I/O na Figura 5.2). O controle do processo, edição do modelo e alteração de parâmetros de teste é realizado na estação de trabalho (elemento à esquerda na Figura 5.3).

Figura 5.3 – Esquemático de interação entre os elementos na simulação em tempo real.



Fonte: Autoria própria.

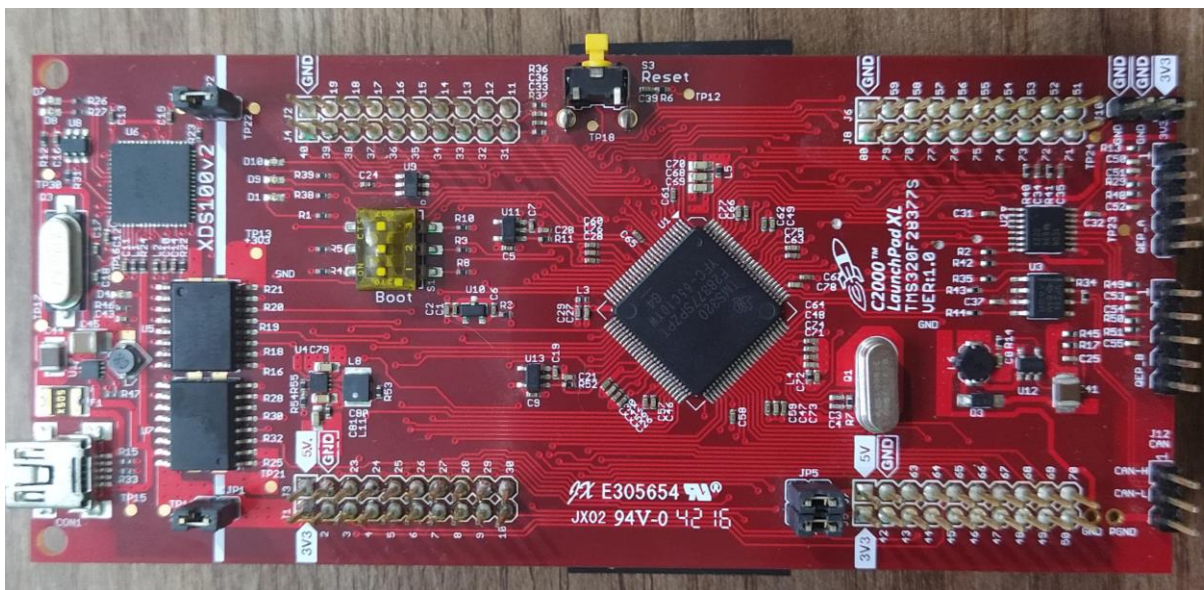
O *software* utilizado no equipamento para modelagem do sistema teste e dos modelos de FAI mostrados no Capítulo 2 é o *Hypersim*. O *Hypersim* é um *software* dedicado a estudos em tempo real que envolvem transitórios eletromagnéticos de até 100 kHz em sistemas elétricos de grande porte (até 10.000 nós). O *software* pertence ao pacote de aplicativos do simulador em tempo real OPAL-RT.

5.2.2 Hardware desenvolvido

Para implementação e teste dos algoritmos de detecção de FAI, foi necessário o desenvolvimento de uma plataforma (ou *hardware*) capaz de funcionar de forma similar a um relé de proteção. Para isto, utilizou-se a placa de desenvolvimento Delfino LAUNCHXL-F28377S, ilustrada na Figura 5.4, da fabricante Texas Instruments, como placa de processamento de dados e execução dos algoritmos. A placa conta com o processador TMS320F28377S o qual possui como principais características:

- 200 MHz - 32Bits – CPU;

Figura 5.4 – Kit de desenvolvimento Delfino LAUNCHXL-F28377S.



Fonte: Autoria própria.

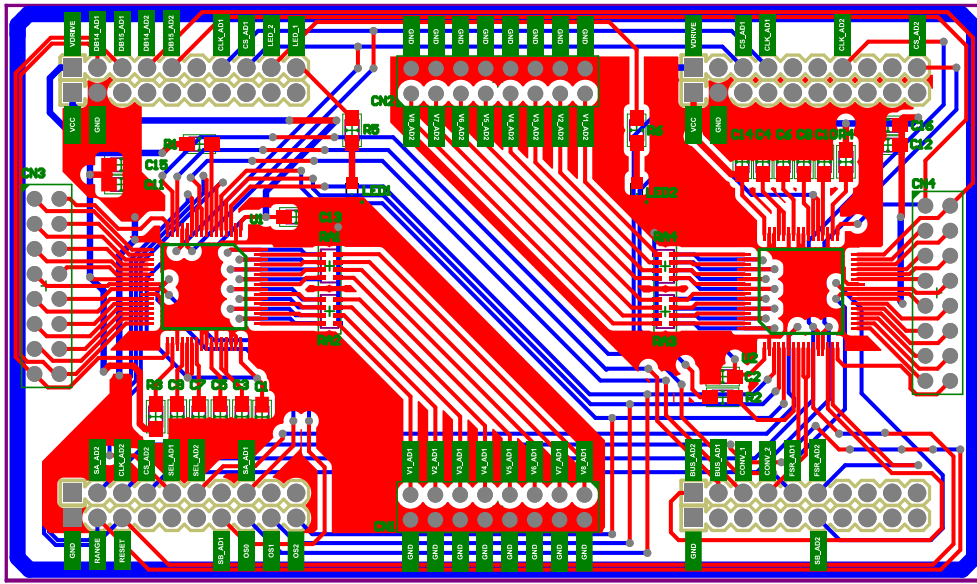
- Unidade de ponto flutuante de precisão única IEEE 754;
- Unidade matemática trigonométrica;
- Unidade matemática para números complexos;
- 512KB de memória FLASH;
- 132KB de memória RAM;
- 2 acessos a memória RAM externos;
- Periférico de controle de interrupção.

Além destas características o microprocessador ainda conta com diversos periféricos de comunicação como SPI, UART, USB2.0, CAN e McBSPs.

Para realização das leituras analógicas dos sinais proveniente do RTS OP5700 (ou qualquer sistema analógico semelhante) foi desenvolvido, desde o projeto até a fabricação, um *hardware* para aquisição de dados em alta resolução com alta taxa de amostragem. A Figura 5.5 mostra o *layout* da placa desenvolvida para aquisição dos dados, enquanto a Figura 5.6 mostra a placa fabricada e montada. Na Figura 5.7 é mostrado o *hardware* completo, isto é, as duas placas mostradas anteriormente conectadas. Na placa de processamento são implementados e executados os algoritmos e a placa de aquisição de dados é feita a conversão analógica digital dos sinais provenientes do RTS OP5700.

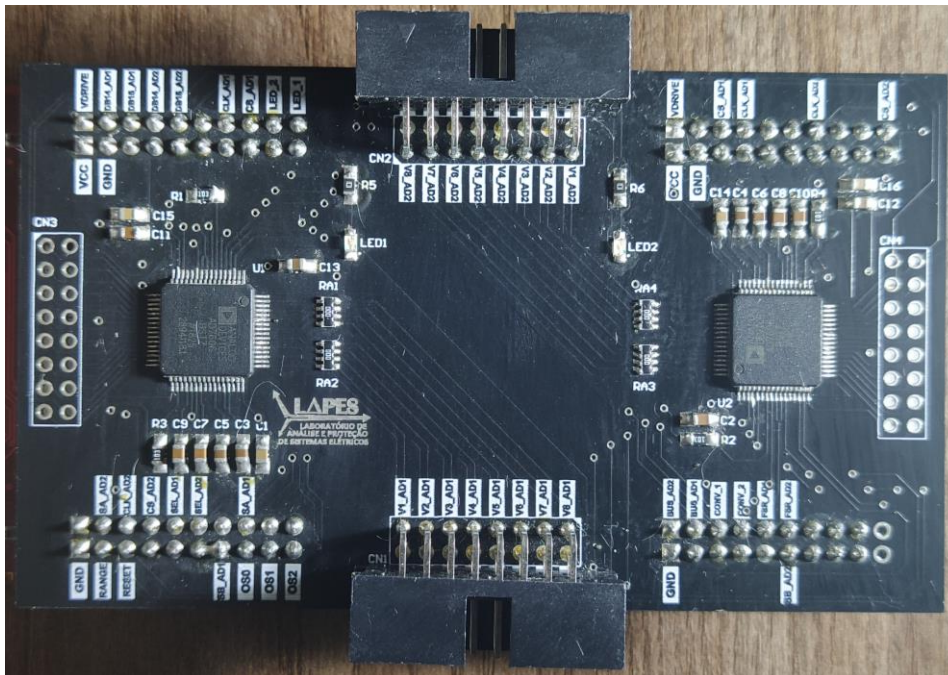
O *hardware* desenvolvido para implementação dos algoritmos possui as seguintes características em termos de aquisição de sinais:

Figura 5.5 – Projeto do *hardware* para aquisição de sinais analógicos.



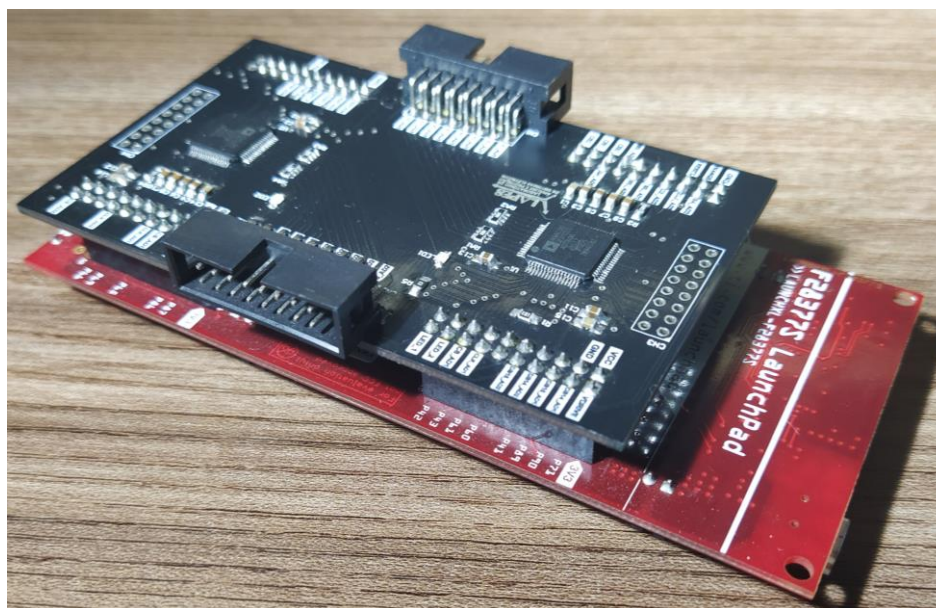
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.6 – *Hardware* final de aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria.

- 200 kHz de amostragem por canal (ou seja, 3333 amostras por ciclo de rede em 60 Hz);
- Amostragem de até 16 canais em paralelo (ou seja, todos canais são amostrados simultaneamente);
- 16 Bits de resolução;

Figura 5.7 – *Hardware* completo ou protótipo de relé de proteção.

Fonte: Autoria própria.

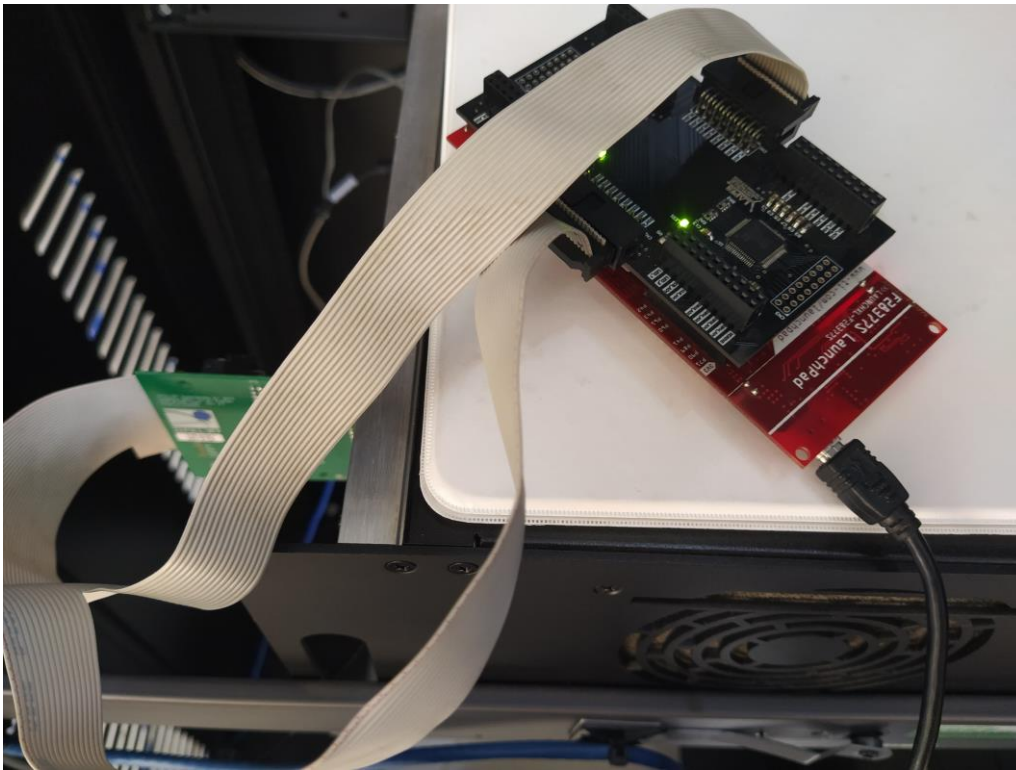
- Range de tensão ajustável ($\pm 10V$ e $\pm 5V$).

Na Figura 5.7, a placa superior (em cor preta) faz a conversão dos sinais de tensão e envia através de 4 periféricos de SPI a uma frequência de 20 MHz para a placa inferior (em cor vermelha), onde é realizado (no microprocessador) a execução dos algoritmos de detecção de FAI baseado nos sinais amostrados. Além dos algoritmos, o microprocessador controla toda a comunicação com a placa superior através de interrupções de periféricos de comunicação e também de tempo de amostragem.

A Figura 5.8 mostra o *hardware* e o RTS OP5700 conectados para realização de simulações em tempo real, mais especificamente, simulações em HIL. Ainda na mesma figura, o cabo conectado ao *hardware*, faz a interface com um PC para visualização de oscilografias e também de resultados como tempo de execução dos algoritmos e tempo de detecção da FAI.

A programação do processador TMS320F28377S foi realizada em linguagem C, através do programa CCS (*Code Compuser Studio*). Enquanto que para a visualização de oscilografias de tensão e corrente, foi desenvolvido um programa em *python* (sendo executado no computador) que faz a comunicação via SERIAL (cabo USB).

Figura 5.8 – Hardware e OP5700 conectados para simulações do tipo HIL.



Fonte: Autoria própria.

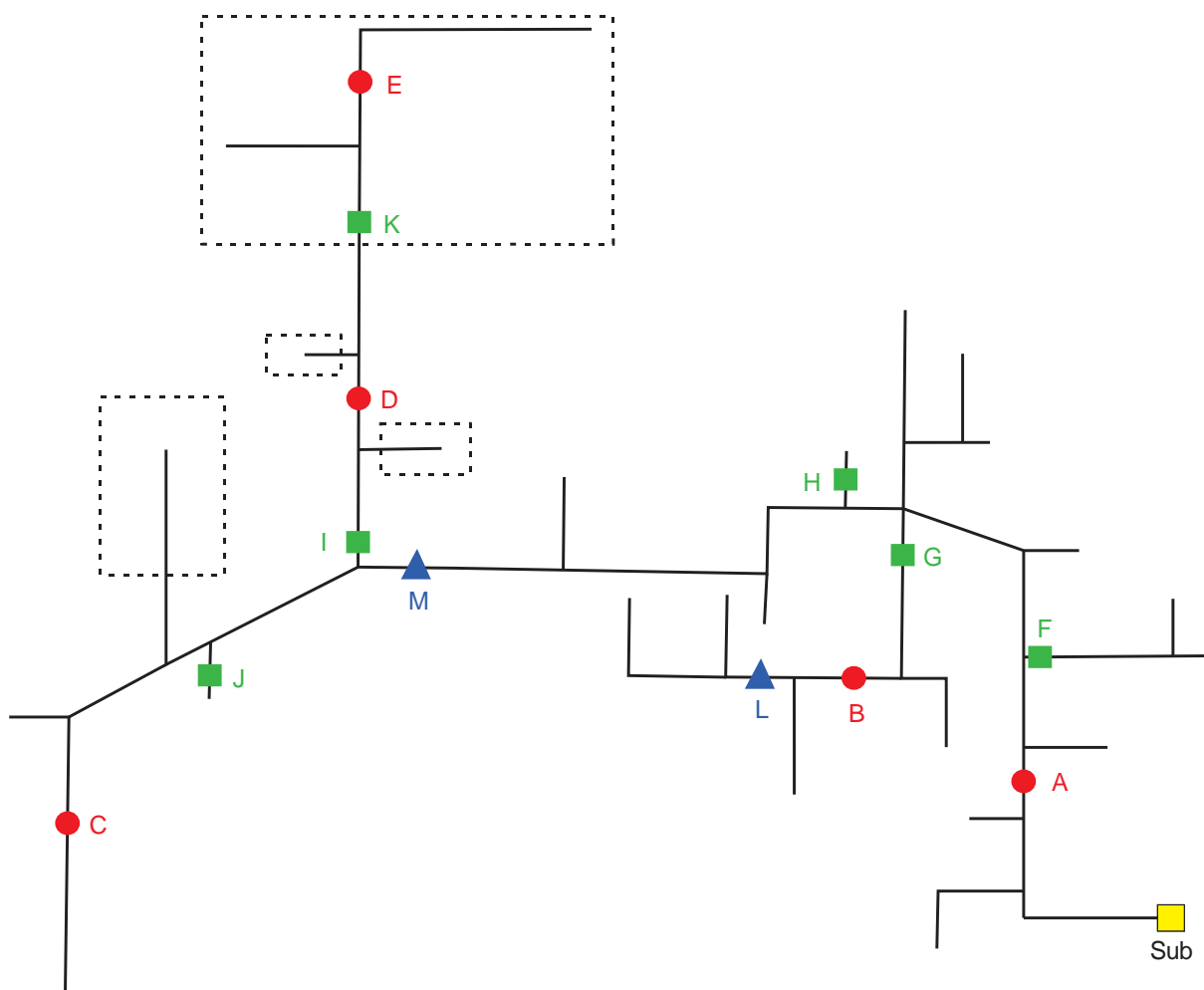
5.3 SISTEMA TESTE

Para a avaliação dos algoritmos foi implementado um sistema teste baseado em uma rede de distribuição real. O alimentador utilizado é mostrado na Figura 5.9. Devido a extensa dimensão do alimentador e o grande número de cargas, não foi possível representar em detalhes as cargas e as chaves distribuídas ao longo da rede. Os círculos (em vermelho) representam os locais onde foram aplicadas as FAI, os quadrados (em verdes) representam chaves do sistema que foram utilizadas para testes de entrada e saída de carga, e os triângulos (em azuis) representam os dois bancos de capacitores presentes no alimentador.

O alimentador possui as seguintes características:

- A maioria das cargas é trifásica. No entanto, existem alguns ramais monofásicos, os quais produzem uma pequena corrente de neutro. Esses ramais monofásicos estão marcados nas caixas tracejadas da Figura 5.9.
- A potência da carga na qual os testes foram realizados é de 12 MVA, o que corresponde a aproximadamente metade da capacidade do alimentador.
- A tensão nominal é 13,8kV;

Figura 5.9 – Esquemático simplificado do alimentador utilizado.



Fonte: Autoria própria.

- A maior distância é de aproximadamente 58 km, porém a concentração de carga está localizada na região mais próxima da subestação (quadrado em amarelo), ou até o ponto “M” marcado na Figura 5.9.

Este alimentador foi implementado no Hypersim, porém foi necessário realizar algumas simplificações. Foi realizado o equivalente elétrico de alguns ramais que estavam conectados no ramal principal e que não seriam utilizados para teste. Estas simplificações foram necessárias pois o sistema original possui um número elevado de nós e não foi possível atingir um tempo de simulação aceitável para os testes dos algoritmos (no caso em análise, o tempo de simulação desejado era 130,2 μ s, o que corresponde a 128 amostras por ciclo em 60 Hz e é a resolução utilizada para os algoritmos testados). Os requisitos de tempo poderiam ser alcançados caso fosse utilizado mais de um núcleo no RTS. Porém, optou-se por não realizar o processamento paralelo do Hypersim devido à dificuldade de uso do método de desacoplamento (necessário

para o processamento paralelo) e também por inserir distorções nos resultados quando não configurado de forma precisa. Outro fator, é que o processamento paralelo não é recomendado para sistemas de grande porte (MUGOMBOZI et al., 2012).

5.3.1 Casos testados

De modo a avaliar a confiabilidade do algoritmo de detecção e classificação de FAI proposto, bem como, os demais métodos elucidados no Capítulo 3, foram estabelecidos diferentes cenários de análise. A disponibilidade dos métodos foi analisada simulando casos de FAI, incluindo:

Tipo S – Shunt;

Tipo RLF – FAI no lado da fonte com rompimento de cabo;

Tipo RLC – FAI no lado da carga com rompimento de cabo;

Tipo RLFC – FAI em ambos os lados (fonte e carga) com rompimento de cabo.

Já em termos de segurança, isto é, eventos que podem ser erroneamente detectados como FAI, os métodos foram testados para chaveamentos de transformadores, banco de capacitores e entrada/saída de carga. A seguir, todos os cenários são elucidados.

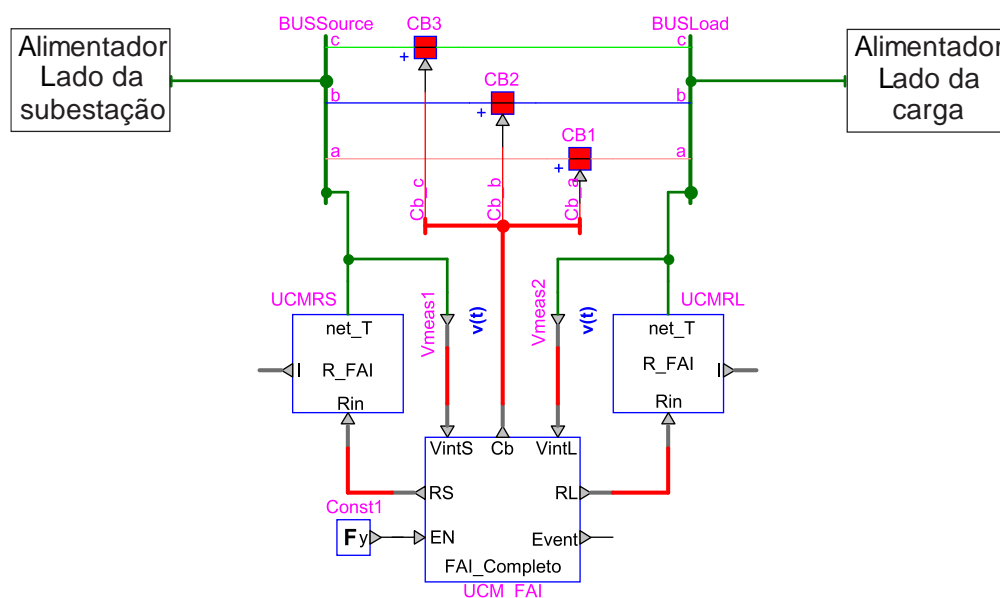
5.3.1.1 Modelagem da FAI

De forma a buscar identificar qual o modelo melhor representa as características da FAI, e também verificar se o modelo influencia no desempenho dos algoritmos, os dois modelos de FAI descritos no Capítulo 2 foram testados. Os modelos de FAI propostos por Santos et al. (2013) e Gautam e Brahma (2012) foram implementados no Hypersim permitindo assim estudos em SIL, HIL e PHIL. Tais modelos foram implementados no bloco UCM (bloco muito utilizado para construção de componentes e também implementação de métodos no Hypersim), o qual permite, via programação em C++, a integração de algoritmos e lógicas condicionais, visando a simulação em tempo real. Para atingir esse objetivo, o simulador digital precisa resolver as equações do modelo para 1 passo de tempo de simulação antes de 1 passo de tempo no mundo real (WONTROBA et al., 2019a, 2019b).

5.3.1.1.1 Modelo 1 de FAI (SANTOS et al., 2013)

O presente modelo, que é fundamentado em resistências variáveis, foi elucidado na seção 2.4.1. A modelagem realizada possibilita a aplicação de FAI em qualquer uma das fases e também permite simular os 4 tipos de FAI. Além disso, também possui 6 tipos de solo diferentes (ver Figura 2.5). O esquemático do modelo desenvolvido no Hypersim é ilustrado na Figura 5.10, onde os blocos “R_FAI” são resistências que representam a FAI e controladas pelo bloco principal “FAI_completo”. Neste bloco principal é onde o modelo de FAI é processado fazendo a leitura das tensões nas barras tanto no lado da carga como no lado da subestação. Os blocos vermelhos são disjuntores que representam o rompimento de cabo em cada fase, estes blocos também são controlados pelo bloco principal.

Figura 5.10 – Modelo de FAI utilizando resistências variáveis.



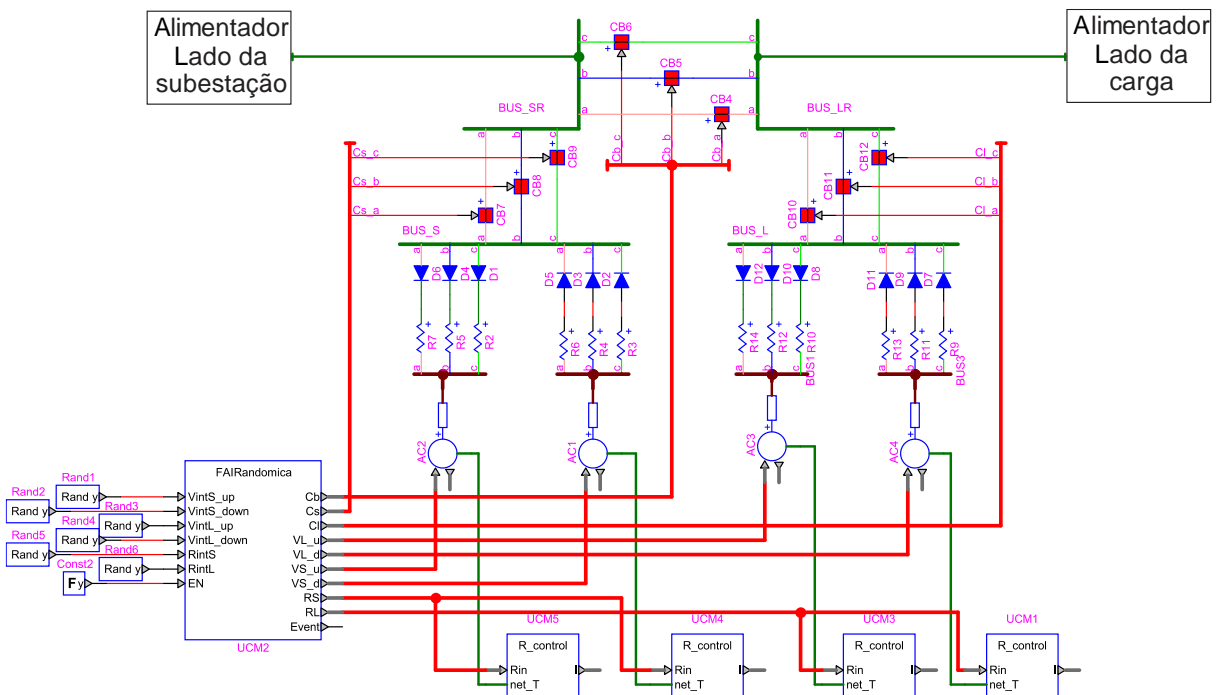
Fonte: Autoria própria.

Com este modelo foram realizadas simulações de FAI nos pontos: A, B, C, D e E da Figura 5.9. Foram realizadas simulações em diferentes fases com diferentes tipos de solo, somando um total de 72 simulações por ponto, em exceto o ponto E com 12 simulações devido ser um ramal monofásico, ou seja, somente há uma fase para testes e também por testes com FAI do Tipo RLC e RLFC perdem o sentido devido não haver energização no lado da carga quando se trata de ramais monofásicos, ficando assim, somente testes do Tipo S e Tipo RLF. No total, foi realizado 300 simulações de FAI com o modelo 1 para cada algoritmo testado.

5.3.1.1.2 Modelo 2 de FAI (GAUTAM; BRAHMA, 2012)

O segundo modelo de FAI testado foi apresentado na subsecção 2.4.2. A Figura 5.11 mostra a interface do modelo que utiliza variações randômicas nas resistências e também na fonte de tensão antiparalelo. Os 4 blocos inferiores são representações das resistências variáveis do modelo e os 4 itens logo acima (componentes com as iniciais AC) são fontes de tensão, ambas são controladas por o bloco “FAI_randômica”. Este bloco recebe valores aleatórios (seis blocos a esquerda do bloco “FAI_randômica”) e ajusta-os criando 4 tipos distintos de solo. Os 4 tipos de solos testados possuem as características mostradas na Tabela 5.1 e mostram os valores e suas variações que foram utilizados no modelo, sendo as variáveis V_p e V_n a representação das fontes de tensão, enquanto que R é a representação das resistências R_p e R_n , seguindo a lógica da Figura 2.10. Neste bloco também é possível controlar qual dos 4 tipos de FAI será aplicado no circuito.

Figura 5.11 – Modelo de FAI utilizando variação randômica.



Fonte: Autoria própria.

Os pontos de simulação foram os mesmos locais testados para o Modelo 1. Porém como este modelo prevê quatro tipos de solo, o número total de simulações somou 200 por algoritmo.

Tabela 5.1 – Configuração de solo utilizada no modelo de variações randômicas.

Configuração	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
V _p (V)	1000±100	1500±150	2000±200	2500±250
V _n (V)	-500±50	-1000±100	-1500±150	-2000±200
R _p = R _n (Ω)	110±20	160±30	210±40	260±50

Fonte: Autoria própria.

5.3.1.2 Religamento e abertura de ramal com Inrush de transformador

Foi realizado, em quatro ramais, testes de religamento de ramal levando em consideração o *inrush* dos transformadores. Quatro ramais foram testados, sendo as chaves de fechamento estão localizadas nos pontos “F”, “G”, “I” e “K” da Figura 5.9. Os 4 ramais possuem as seguintes características:

- a chave “F” conecta um ramal contendo somente cargas trifásicas equilibradas com transformadores da distribuição ligados em delta-estrela aterrado;
- a chave “G” conecta um ramal contendo um banco de capacitores no ponto “L” conectado em delta;
- a chave “I” liga um ramal contendo cargas trifásicas equilibradas e também contendo outros 3 ramais monofásicos, os quais geram um desequilíbrio na corrente;
- a chave “K” conecta um ramal puramente monofásico ligado a fase “A” do sistema;
- o nível de corrente de fase para ramais conectados pelas chaves “F”, “G” e “I” é em torno de 70 A, enquanto para o ramal conectado pela chave “K” é de aproximadamente 10 A.

Foi analisado o religamento destes 4 pontos citados devido ao fato de serem completamente diferente, proporcionando uma análise mais apurada a respeito de religamento e abertura de ramal considerando *inrush* de transformador.

Nos pontos “F”, “G” e “I”, onde o ramal é trifásico, foi analisado a abertura e o fechamento trifásico e monofásico das chaves. Sendo as manobras monofásicas testadas nas sequências de fases: ABC, BCA, CAB, CBA, BAC e ACB. Onde os tempos de acionamento de cada chave, tanto para testes de religamento como abertura de ramal, são aleatórios.

No total, realizou-se 44 simulações entre religamento e abertura de ramal considerando *inrush* nos transformadores do ramal sob teste.

5.3.1.3 *Religamento com FAI e Inrush de transformador*

Com o intuito de verificar se um *inrush* de transformador não atrapalha a detecção de uma FAI, também foram realizadas manobras nos mesmos ramais apresentados na subseção anterior, incluindo agora uma FAI já presente no ramal em análise. Para os ramais conectados pelas chaves “G”, “I” e “K” a o modelo de FAI foi inserido nos pontos “B”, “D” e “E”, já no ramal conectado pela chave “F” o modelo foi inserido na metade da distância deste ramal.

Neste cenário foram testados os dois modelos de FAI com dois tipos de solo em cada modelo. Os tipos de solo escolhidos em cada modelo para o teste foram o de maior e o de menor amplitude de corrente de FAI.

Também neste cenário foram testados casos de FAI do Tipo S, RLF, RLC e RLFC em ramais trifásico e do Tipo S e 2 no ramal monofásico. O religamento das chaves de cada ramal em análise foi trifásico apenas, e a fase sob FAI foi a fase “A” para os ramais das chaves “F”, “G” e “K”. Já para o ramal da chave “I” foi testado a FAI nas três fases da rede devido ser o único ramal que apresenta desequilíbrio de corrente. No total, somou-se 44 casos para cada modelo de FAI.

5.3.1.4 *Chaveamento de Capacitor*

O sistema teste utilizado possui dois bancos de capacitores localizados nos pontos “L” e “M” da Figura 5.9. No sistema teste real, estes capacitores estão conectados em delta. No presente cenário de teste foram realizadas simulações com ligações em delta e em estrela. Também foi verificado o desempenho dos métodos durante a entrada e a saída dos capacitores na rede, assim como, o chaveamento monofásico e trifásico. Os valores dos capacitores tanto no ponto “L” como no ponto “M” são correspondentes a 600 kVAr. Neste cenário de testes obteve-se 56 simulações.

5.3.1.5 *Chaveamento de carga – Entrada e Saída*

Para complementar os testes que avaliam a segurança dos métodos de detecção de FAI, foram simulados casos de entrada e saída de cargas, tanto na média tensão (13,8 kV), quanto na baixa (380V).

Nos testes de baixa tensão, as cargas foram conectadas nos pontos “H” e “J”. No ponto “J” uma carga trifásica de 2 MVA e no ponto “H” uma carga trifásica de 300 kVA. O ponto “J” foi escolhido por possuir uma carga extremamente alta, o que torna o teste mais coerente. Em ambos os cenários foram testados casos de entrada e saída da carga com chaveamento trifásico e monofásico, obedecendo as sequências de chaveamento citadas na secção 5.3.1.2..

Para os testes realizados na média tensão foram usados os pontos “H”, “J”, “F”, “I” e “K”. Os pontos “F”, “I” e “K” simulam a entrada e a saída de um ramal. Já os pontos “H” e “J” simulam a entrada e saída de uma carga isolada. Assim, somou-se um total de 86 simulações entre entrada e saída de cargas.

5.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

A partir das simulações em HIL dos cenários citados na subsecção anterior, obtêm-se a resposta para detecção de FAI de cada algoritmo testado. Onde:

- Algoritmo A – é o algoritmo mostrado secção 3.2.1, desenvolvido por Torres et al. (2014);
- Algoritmo B – é mostrado na secção 3.2.2, desenvolvido por Gautam e Brahma (2012);
- Algoritmo C – é mostrado na secção 3.2.3, desenvolvido por Lima (2016);
- Algoritmo D – é mostrado na secção 3.2.4, desenvolvido por Subramanian e Venkataraman (2012);
- Algoritmo E – é o algoritmo desenvolvido neste trabalho, contendo detector e classificador de FAI e também classificador de tipo de FAI.

A resposta para detecção de FAI é subdividida conforme os critérios:

- Verdadeiro Positivo (VP) que mostra o número de detecções corretas de FAI;
- Falso Negativo (FN) que mostra o número de casos de FAI que o algoritmo não detectou;
- Falso Positivo (FP) que mostra as detecções incorretas em casos de outros eventos;
- Verdadeiro Negativo (VN) que representa as condições normais onde não houve detecção.

Segundo Ghaderi et al. (2017), a partir dos critério acima citados, pode-se criar diversos indicadores com intuito de medir a confiabilidade do método. A avaliação dos algoritmos deste trabalho será dada sob duas abordagens: taxa de acerto para casos de FAI, e taxa de acerto para casos de não FAI. Onde estas abordagens são definidas da seguinte forma:

- Taxa ou índice de acerto para casos de FAI, ou disponibilidade do algoritmo, definida como “medida da certeza de que os relés irão operar corretamente para todas as falhas para as quais foram projetados para operar” (HOROWITZ; PHADKE, 2008, p. 7, tradução nossa). Este indicador é calculado de acordo com a Equação (5.1), e mede a probabilidade de funcionamento correto do algoritmo quando houver a necessidade de sua atuação:

$$\frac{VP}{VP + FN} \% \quad (5.1)$$

O índice é dado pelas detecções corretas de FAI dividido pelo número de casos de FAI testados.

- Taxa ou índice de acerto para casos de não FAI, ou segurança do algoritmo, definida como “medida da certeza de que os relés não funcionarão incorretamente por qualquer falha” (HOROWITZ; PHADKE, 2008, p. 7, tradução nossa). Este indicador é mensurado conforme a Equação (5.2), e visa identificar a capacidade do método em não detectar FAI indevidamente para outras condições, ou seja, mede a habilidade do algoritmo de deixar de operar desnecessariamente:

$$\frac{VN}{VN + FP} \% \quad (5.2)$$

O índice é dado pelas detecções corretas em eventos não característicos com FAI dividido pelo número de eventos não FAI testados.

Além de analisar a detecção de FAI, é analisado a classificação da fase e do tipo de FAI. Essas classificações são avaliadas verificando a taxa de acerto de cada algoritmo. Uma análise qualitativa é feita de modo a comentar a performance de cada algoritmo para tais classificações. Vale lembrar que somente o algoritmo proposto E possui detector de tipo de FAI e somente o algoritmo D não possui classificador de fase.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as principais características do RTS utilizado para fazer as simulações em HIL. Também o *hardware* desenvolvido foi mostrado, utilizado para embarcar os algoritmos de detecção de FAI e também as funções básicas para leitura Analógica-Digital.

O alimentador teste utilizado nas simulações também foi apresentado neste capítulo, assim como os pontos na rede onde são realizadas cada caso testado. Em seguida, cada caso é apresentado e mostrado detalhadamente, trazendo uma justificativa para sua avaliação.

Por último, o capítulo apresentou os parâmetros para avaliação dos algoritmos que serão utilizados no capítulo dos resultados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo apresenta os resultados obtido das simulações em tempo real dos algoritmos A, B, C, D e E, como apresentado na secção 5.4, que foram implementados em *hardware*. Análise comparativa entre os Modelos de FAI também é apresentado.

No total, foram realizadas 774 simulações para cada algoritmo, sendo 588 casos de FAI e 186 casos referentes a outros eventos, os quais foram citados na secção 5.3.1. Dos 588 casos de FAI, 300 são simulações com o Modelo 1, 200 com o Modelo 2, 44 com religamento de ramal na presença de FAI com Modelo 1, e os outros 44 casos com religamento de ramal na presença de FAI com Modelo 2.

A resposta dos algoritmos foi realizada tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. A análise quantitativa analisou a eficiência de cada algoritmo em termos numéricos, já na análise qualitativa é realizado uma avaliação pelos resultados alcançados.

6.2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA

A análise quantitativa dos algoritmos é feita tanto para a detecção e classificação de FAI. Porém, para classificação do tipo de FAI, não há comparação com os demais algoritmos, devido ao fato de somente o algoritmo proposto possuir esta característica. A ênfase maior se dá na análise da detecção de FAI, onde as simulações são analisadas em diferentes cenários: global (incluindo todas as simulações); de forma separada para cada modelo de FAI, e também uma análise considerando os 4 tipos de FAI (que também se subdividem em Modelo 1 e Modelo 2).

6.2.1 Detecção de FAI

Cada caso testado para os algoritmos pode ser classificado como VP, FN, FP e VN os quais representam se o algoritmo atuou ou não em casos onde há e onde não há FAI. A Tabela 6.1 mostra o resultado geral para todas as simulações em HIL.

Tabela 6.1 – Resultado da detecção de FAI para todos os casos testados.

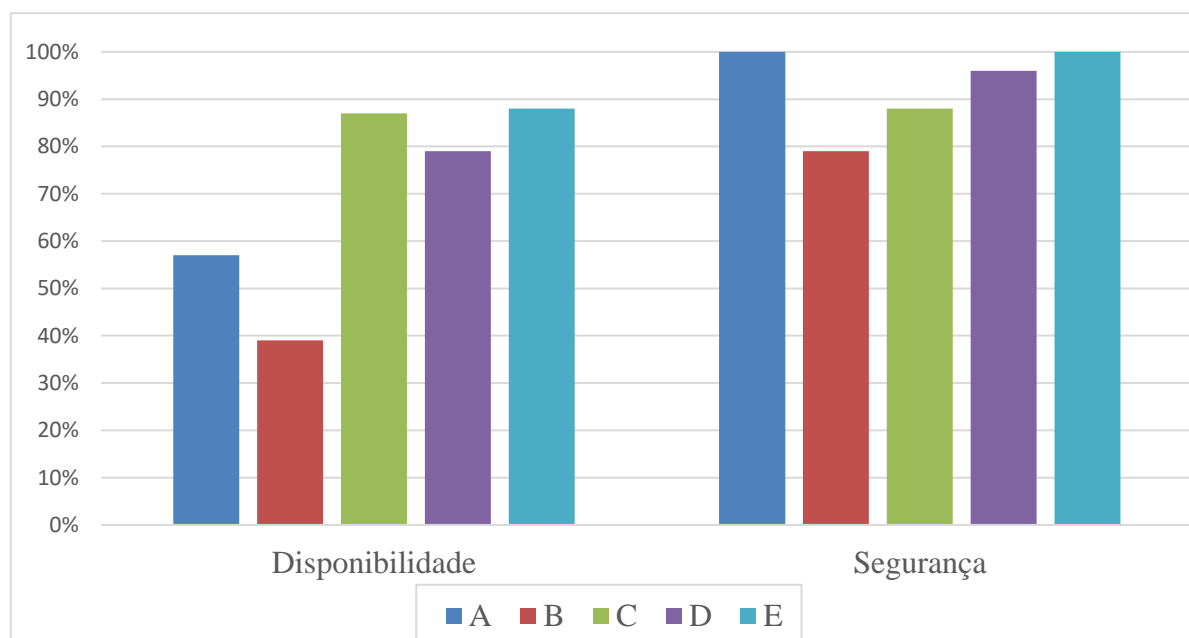
Algoritmo	Casos com FAI		Outros eventos	
	VP	FN	FP	VN
A	334	254	0	186
B	227	361	39	147
C	510	78	22	164
D	467	121	7	179
E	514	74	0	186

Fonte: Autoria própria.

Observando a Tabela 6.1 percebe-se que os algoritmos A e B não apresentaram um VP muito elevado em comparação aos demais algoritmos. Isto se deve ao fato de que o algoritmo A praticamente não atuou em casos de FAI com o Modelo 2 e o algoritmo B não atuou em nenhum caso de FAI com o Modelo 1, na secção 6.3 será abordado os motivos que resultaram na não atuação de cada algoritmo para determinado modelo.

Deste modo, o resultado para os algoritmos A e B ficaram inferiores quando comparados com os demais perante todos os cenários de simulações. A Figura 6.1 apresenta os resultados para cada algoritmo testado, conforme os critérios apresentados na secção 5.4.

Figura 6.1 – Resultado dos algoritmos para todos os casos testados.



Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados dos dois índices mostrados na Figura 6.1, nota-se que o algoritmo desenvolvido (algoritmo E) possui o melhor desempenho nos dois índices. Outros

algoritmos também apresentaram performance similar, como o algoritmo A, quando analisado o índice de segurança. Esta performance elevada dos algoritmos A e E no quesito de segurança, ocorre devido ao fato de ambos algoritmos não apresentarem detecção indevida em casos eventos que não são FAI, como pode ser visto na Tabela 6.1, onde os valores de FP correspondem a 0 para ambos algoritmos.

No quesito de disponibilidade, o algoritmo C também apresentou uma performance similar ao algoritmo E. Isso se deve aos dois algoritmos apresentarem a melhor taxa de acerto nos casos de FAI, ou seja, por possuírem o menor FN da Tabela 6.1.

Em termos de segurança, três algoritmos apresentaram atuação indevida em testes com outros eventos. A Tabela 6.2 mostra o número de detecções corretas e incorretas para chaveamento de carga, banco de capacitores e transformador.

Tabela 6.2 – Resultado da detecção para casos de outros eventos.

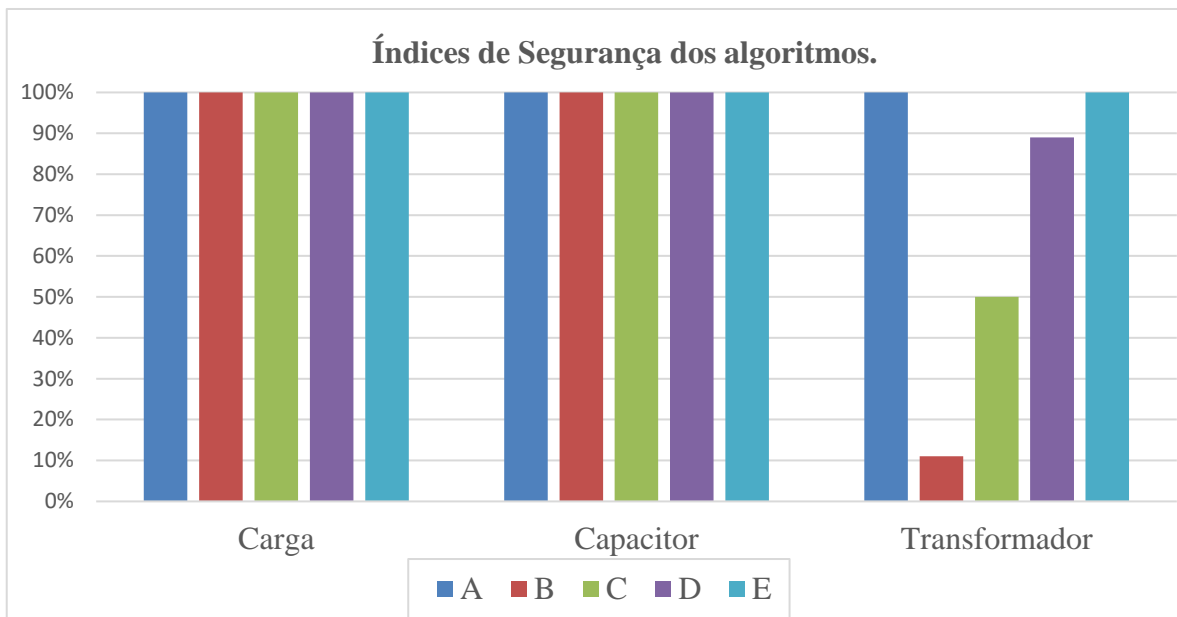
Algoritmo	Carga		Capacitor		<i>Inrush</i> de Trafo	
	FP	VN	FP	VN	FP	VN
A	0	86	0	56	0	44
B	0	86	0	56	39	5
C	0	86	0	56	22	22
D	0	86	0	56	7	37
E	0	86	0	56	0	44

Fonte: Autoria própria.

Os resultados para o índice de segurança podem ser visualizados na Figura 6.2. O caso mais crítico foi para as simulações de chaveamento de transformador, onde o algoritmo B apresentou atuação indevida para quase todos os casos deste tipo de teste. Nos casos de chaveamento de carga e de capacitor, não foi verificado nenhuma atuação indevida dos algoritmos, levando o índice de segurança, para estes casos, a 100%.

A Tabela 6.3 traz os resultados para os casos de FAI com o Modelo 1 e Modelo 2. Para os testes de FAI com o Modelo 1, observa-se que o algoritmo B não atuou em nenhum caso. O algoritmo A apresentou um desempenho muito distinto para os dois modelos de FAI, tendo poucas atuações com o Modelo 2. O índice de disponibilidade dos algoritmos para os casos de FAI com o Modelo 1 e Modelo 2 podem ser vistos na Figura 6.3. Os algoritmos A e E apresentaram o melhor desempenho para o Modelo 1. Já para o Modelo 2, a melhor performance foi alcançada pelos algoritmos C e E.

Figura 6.2 – Índice de segurança dos algoritmos para os casos chaveamento de carga, chaveamento de capacitor e chaveamento de transformador.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6.3 – Resultado da detecção para casos de FAI com o modelo 1 e o modelo 2.

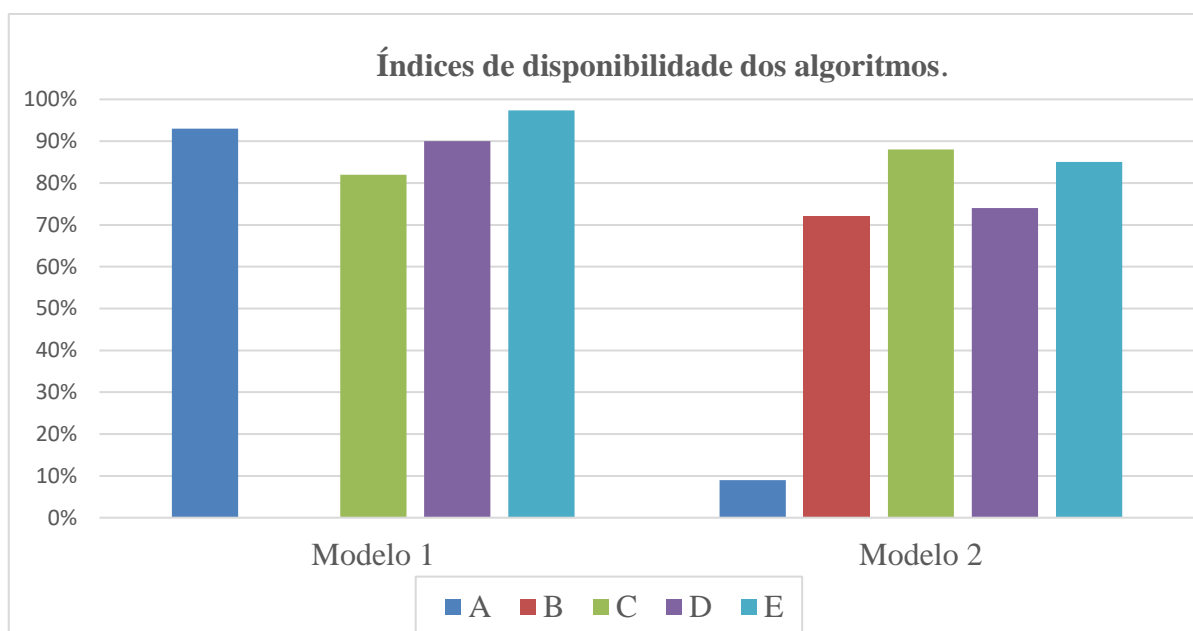
Algoritmo	FAI com modelo 1		FAI com modelo 2	
	VP	FN	VP	FN
A	279	21	18	182
B	0	300	143	57
C	246	54	176	24
D	269	31	147	53
E	292	8	170	30

Fonte: Autoria própria.

Para os casos de religamento de ramal, considerando o *inrush* dos transformadores e FAI com os dois modelos, tem-se os resultados mostrados na Tabela 6.4.

Nestes testes, os algoritmos com melhor desempenho foram o B e C. Porém, vale lembrar que estes algoritmos tiveram uma alta taxa de atuação indevida para casos de religamento de transformador. Isto descaracteriza os resultados para disponibilidade nos casos de religamento de ramal, pois não se pode afirmar que o resultado dos algoritmos se dá devido a atuação correta no caso da FAI ou da atuação incorreta no caso do *inrush* do transformador. A Figura 6.4 mostra o desempenho dos algoritmos quando comparados apenas com casos de religamento com FAI do Modelo 1 e do modelo 2.

Figura 6.3 – Índice de disponibilidade dos algoritmos para os casos de FAI com o modelo 1 e modelo 2.



Fonte: Autoria própria.

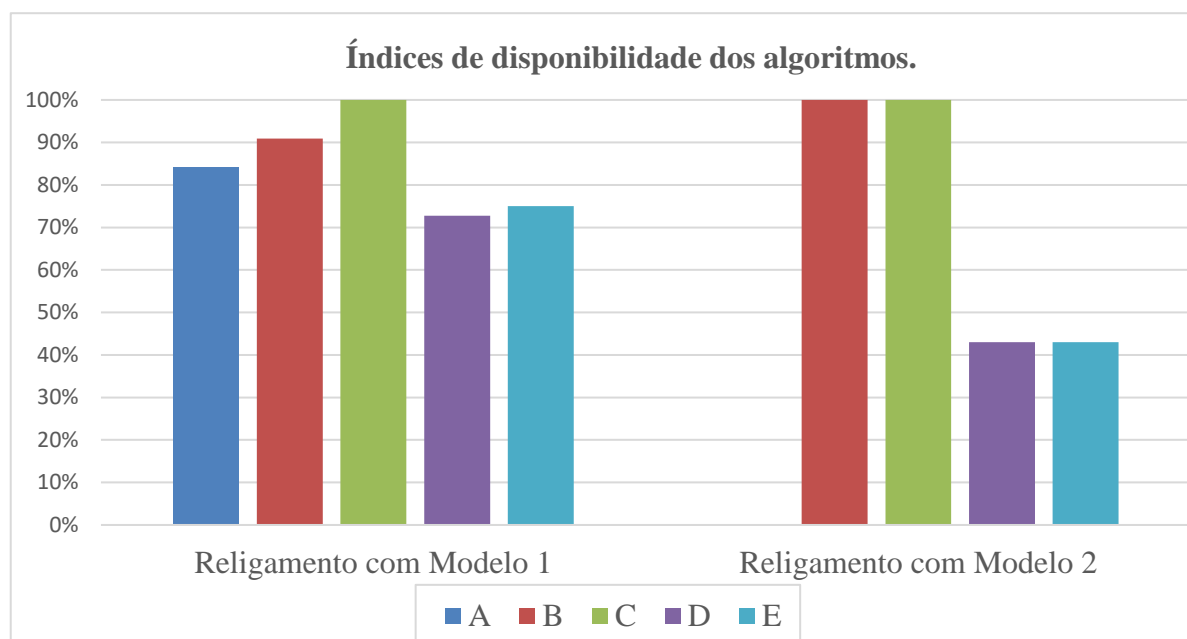
Tabela 6.4 – Resultado da detecção para casos de Religamento de ramal considerando inrush de transformador e FAI com o modelo 1 e o modelo 2.

Algoritmo	Religamento com FAI do modelo 1		Religamento com FAI do modelo 2	
	VP	FN	VP	FN
A	37	7	0	44
B	40	4	44	0
C	44	0	44	0
D	32	12	19	25
E	33	11	19	25

Fonte: Autoria própria.

De forma geral, fazendo um comparativo entre os resultados dos Modelos 1 e 2, os algoritmos D e E apresentaram a maior estabilidade nos resultados, sendo o algoritmo E o que sofreu menor influência do modelo de FAI, apresentando assim, a melhor performance entre os algoritmos avaliados. Os algoritmos A e B apresentaram resultados distintos entre os dois modelos, porém obtiveram resultados bons quando analisados com o modelo no qual cada autor testou e validou seu algoritmo, ou seja, o algoritmo apresentou bom desempenho no modelo que foi originalmente validado. Já o algoritmo C apresentou bons resultados, porém em casos de religamento com FAI, este algoritmo pode ter atuado devido ao *inrush* dos transformadores e não por haver uma FAI.

Figura 6.4 – Resultado dos algoritmos para os casos de Religamento com FAI do modelo 1 e com modelo 2.



Fonte: Autoria própria.

Com intuito de examinar a influência dos tipos de FAI, a Tabela 6.5 mostra o número de atuações de cada algoritmo para os quatro tipos de FAI apresentados no Capítulo 2. A tabela considera somente os casos de FAI do Modelo 1.

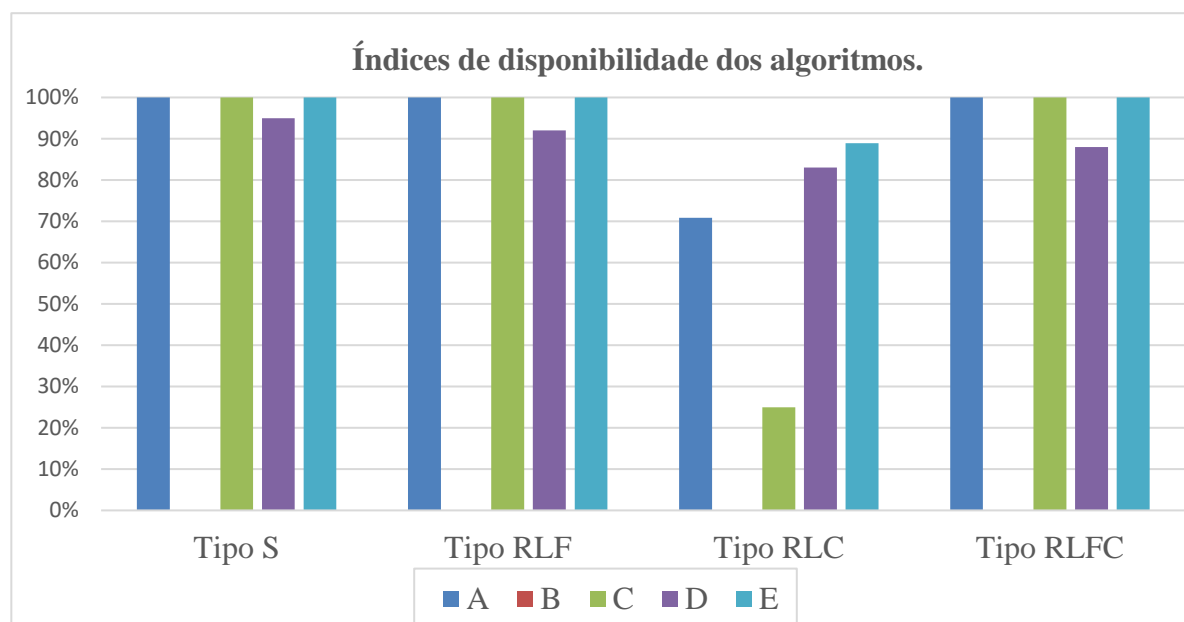
Tabela 6.5 – Resultado da detecção para os quatro tipos de FAI com o modelo 1.

Algoritmo	Tipo S		Tipo RLF		Tipo RLC		Tipo RLFC	
	VP	FN	VP	FN	VP	FN	VP	FN
A	78	0	78	0	51	21	72	0
B	0	78	0	78	0	72	0	72
C	78	0	78	0	18	54	72	0
D	74	4	72	6	60	12	63	9
E	78	0	78	0	64	8	72	0

Fonte: Autoria própria.

A Figura 6.5 mostra, dentro de cada tipo de FAI testado, o quanto cada algoritmo obteve de disponibilidade. Assim, se percebe que os algoritmos A, C e E acertaram todos casos de FAI com os tipos S, RLF e RLFC. A FAI do Tipo RLC foi a que apresentou mais dificuldade de ser detectada, pois como mencionado no Capítulo 2, este tipo de FAI afeta muito pouco a fase em defeito, ficando assim, apenas as fases sãs e a corrente de neutro com distorções mais significativas. Apesar disto, o algoritmo A, que é um método fundamentado na corrente de fase, obteve um desempenho satisfatório quando comparado aos algoritmos D e E, que utilizam a

Figura 6.5 – Índice de disponibilidade dos algoritmos para os tipos de FAI com o modelo 1.



Fonte: Autoria própria.

corrente de neutro no processo de detecção da FAI. Os algoritmos A e C identificaram a FAI no Tipo RLC pelas fases erradas, o que afeta o desempenho na classificação de fase.

Da mesma forma que a análise pelos tipos de FAI com o Modelo 1, a Tabela 6.6 mostra as atuações dos algoritmos para casos de FAI com o Modelo 2

Tabela 6.6 – Resultado da detecção para os quatro tipos de FAI com o modelo 2.

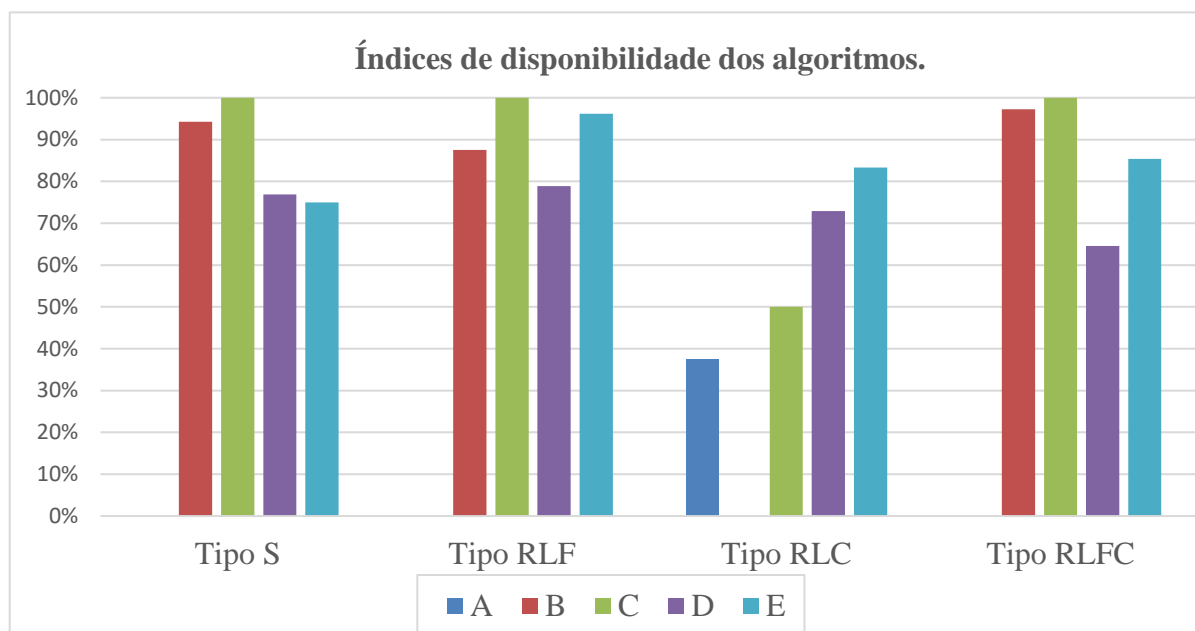
Algoritmo	Tipo S		Tipo RLF		Tipo RLC		Tipo RLFC	
	VP	FN	VP	FN	VP	FN	VP	FN
A	0	52	0	52	18	30	0	48
B	49	3	41	7	0	48	45	3
C	52	0	52	0	24	24	48	0
D	40	12	41	11	35	13	31	17
E	39	13	50	2	40	8	41	7

Fonte: Autoria própria.

A Figura 6.6 mostra o índice de disponibilidade para cada algoritmo testado com o Modelo 2. Novamente, os algoritmos baseados em corrente de neutro se mostraram mais adequados para detecção de FAI do Tipo RLC. Porém, nos tipos S, RLF e RLFC o algoritmo C foi o que obteve o melhor desempenho.

De modo geral, considerando ambos os modelos e todos os tipos de FAI, o algoritmo desenvolvido E se mostrou mais consistente na detecção de FAI, seguidos dos algoritmos C e

Figura 6.6 – Índice de disponibilidade dos algoritmos para os tipos de FAI com o modelo 2.



Fonte: Autoria própria.

D. Também nota-se que FAI do tipos RLC, que raramente são apresentadas em trabalhos de FAI, são as mais difíceis de serem detectadas.

6.2.1.1 Velocidade de detecção de FAI

Os tempos médios de detecção de cada algoritmo para os casos de FAI são apresentados na Tabela 6.7. Na Tabela 6.7, cada linha representa um caso em análise, sendo: “Todas as Simulações” o tempo médio referente a todos os casos de FAI testados; Modelo 1 e 2 o tempo médio em relação aos casos de FAI envolvendo os dois modelos; os casos de Religamento com diferentes modelos refere-se ao tempo médio de detecção para as 44 simulações de cada modelo; e também os tipos de FAI referem-se ao tempo médio de detecção perante cada tipo de FAI.

Analisando os dados da Tabela 6.7, o algoritmo B teve o pior desempenho em termos de velocidade de detecção, levando em média 1,4 segundos para detectar uma FAI. Já o algoritmo C apresentou o melhor resultado, seguido dos algoritmos D e E. Porém, em alguns casos isolados, o algoritmo B foi o mais rápido, pois este requer um tempo mínimo para detecção inferior em comparação aos demais algoritmos. No entanto, testes com alguns tipos de solo no Modelo 2 mostraram um tempo de detecção extremamente elevado (maior que 5 segundos) para o algoritmo B, o que fez com que a média dos tempos de detecção ficasse acima

Tabela 6.7 – Tempo médio (em ms) de detecção dos algoritmos em diferentes casos testados.

Algoritmo		A	B	C	D	E
Todas as Simulações		685	1456	222	267	299
Modelo 1		345	-	230	222	231
Modelo 2		518	2237	217	338	314
Religamento com Modelo 1		3330	236	213	223	473
Religamento com Modelo 2		-	456	213	409	909
Modelo 1	Tipo S	301	-	228	220	226
	Tipo RLF	314	-	221	221	228
	Tipo RLC	597	-	300	228	240
	Tipo RLFC	248	-	223	222	232
Modelo 2	Tipo S	-	2136	224	352	330
	Tipo RLF	-	2738	213	407	308
	Tipo RLC	518	-	214	216	231
	Tipo RLFC	-	1877	214	364	385

Fonte: Autoria própria.

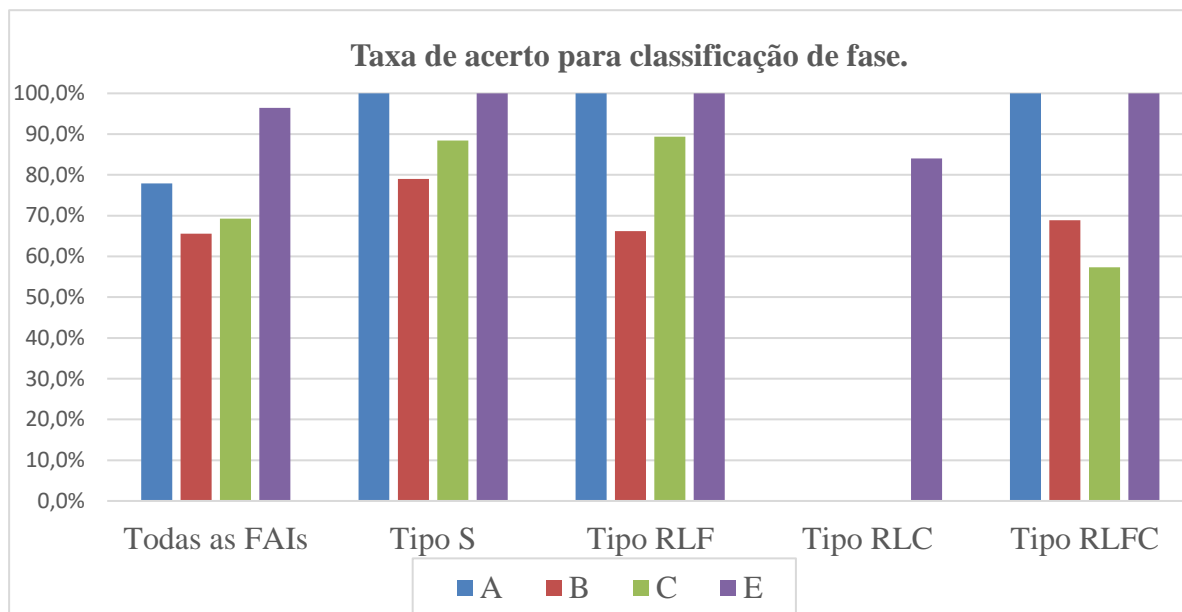
dos demais métodos.

6.2.2 Classificação de fase

A classificação de fase mostrou-se similar entre os dois modelos de FAI testados, desta forma, os resultados apresentados serão divididos somente entre os quatro tipos de FAI. Também não houve diferença significativa entre as fases em análise. A taxa de acerto da classificação de fase de todos os casos testados e também para cada tipo de FAI, separadamente, pode ser visualizado na Figura 6.7.

Observando a Figura 6.7, constata-se que o algoritmo E foi o único capaz de classificar a fase em falta para FAI do Tipo RLC, sendo esta classificação com uma taxa de acerto de 84%. Em uma análise geral, ou seja, todas as simulações, o algoritmo desenvolvido E apresentou uma taxa de acerto de 96,4%, contra 77,9% do algoritmo A, 69,3% do algoritmo C e 65,6% do algoritmo B. Vale lembrar que o algoritmo D não prevê classificação de fase, portanto não está presente nesta análise comparativa.

Figura 6.7 – Taxa de acerto dos algoritmos para classificação de fase.



Fonte: Autoria própria.

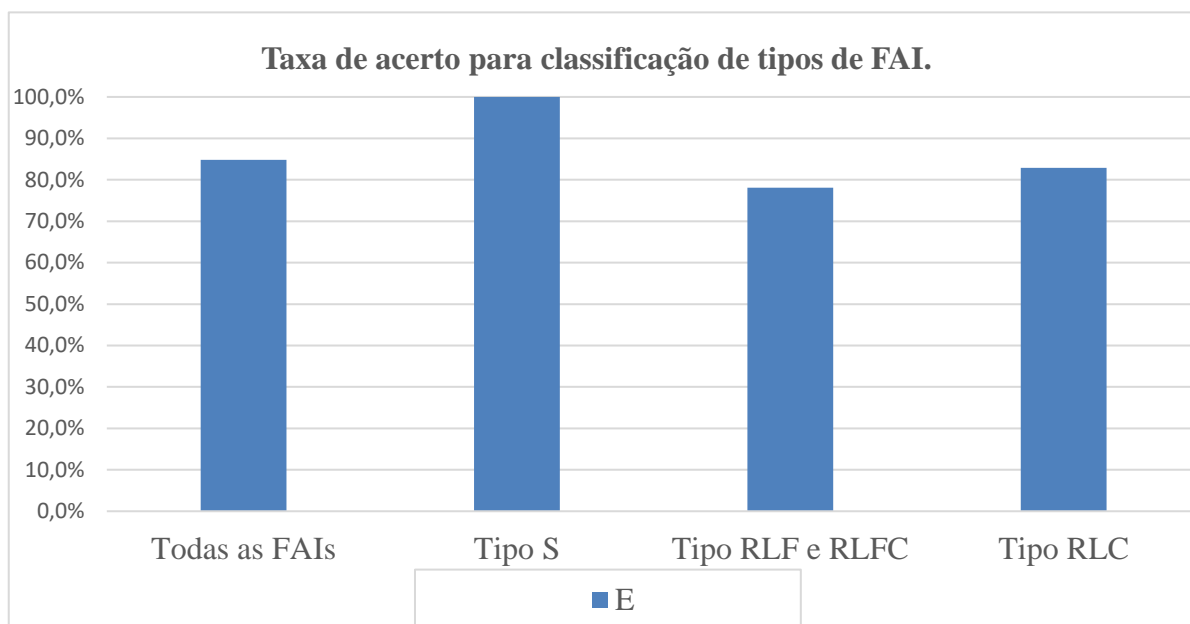
6.2.3 Classificação de tipos de FAI

Nesta secção é apresentada os resultados da classificação dos tipos de FAI apresentado pelo algoritmo E. Como mencionado na secção 4.4, entre os métodos analisados, somente o algoritmo E é capaz de distinguir 3 tipos de FAI. Sendo eles: Tipo S; Tipo RLF; e Tipo RLC. Os casos de FAI do Tipo RLFC são identificadas pelo algoritmo como sendo FAI do Tipo RLF. Os casos de FAI do Tipo RLF e Tipo RLFC possuem a mesma corrente na fase em defeito, somente as fases sãs e o neutro irão possuir correntes diferentes quando analisados estes dois tipos de FAI. Assim, o algoritmo não consegue distinguir entre estes dois tipos de FAI. A Figura 6.8 mostra a taxa de acerto geral e também para cada tipo de FAI simulado.

A taxa de acerto do algoritmo E para o Tipo RLF foi inferior que os demais devido haver simulações em ramais monofásicos com FAI do Tipo RLF. O rompimento de cabo em ramais monofásico dificilmente irá sensibilizar o algoritmo Detector de Rompimento de Cabo apresentado na secção 4.2, pois a perda de carga nestes ramais é normalmente pequena. Desta forma, o classificador de tipo de FAI acaba identificando esses casos como sendo do Tipo S.

Simulações de FAI com rompimento de cabo no ponto “C” da Figura 5.9 também não sensibilizaram o Detector de Rompimento de Cabo. Isto ocorre devido à perda de carga não provocar aumento no desbalanço das correntes do sistema (a secção 6.3.5 explica o motivo de

Figura 6.8 – Taxa de acerto do algoritmo E para classificação de tipos de FAI.



Fonte: Autoria própria.

não ocorrer aumento no desbalanço do sistema neste caso), assim, casos de FAI do Tipo RLF e RLFC acabaram sendo identificados como sendo Tipo S e casos de FAI do Tipo RLC acabam não sendo nem detectados em sua maioria. Os casos de FAI do Tipo RLC que foram identificados em simulações neste mesmo ponto, tiveram uma resposta correta do classificador de tipos de FAI, uma vez que o classificador não depender do Detector de Rompimento de Cabo para classificação do Tipo RLC. Esta característica explica o motivo do algoritmo E apresentar um melhor desempenho na classificação do Tipo RLC, quando comparada aos Tipos RLF e RLFC.

6.3 AVALIAÇÃO QUALITATIVA

Nesta secção é realizada uma análise qualitativa individual de cada algoritmo. Está avaliação busca identificar os pontos fortes e os pontos fracos de cada algoritmo e também indicar possíveis melhorias.

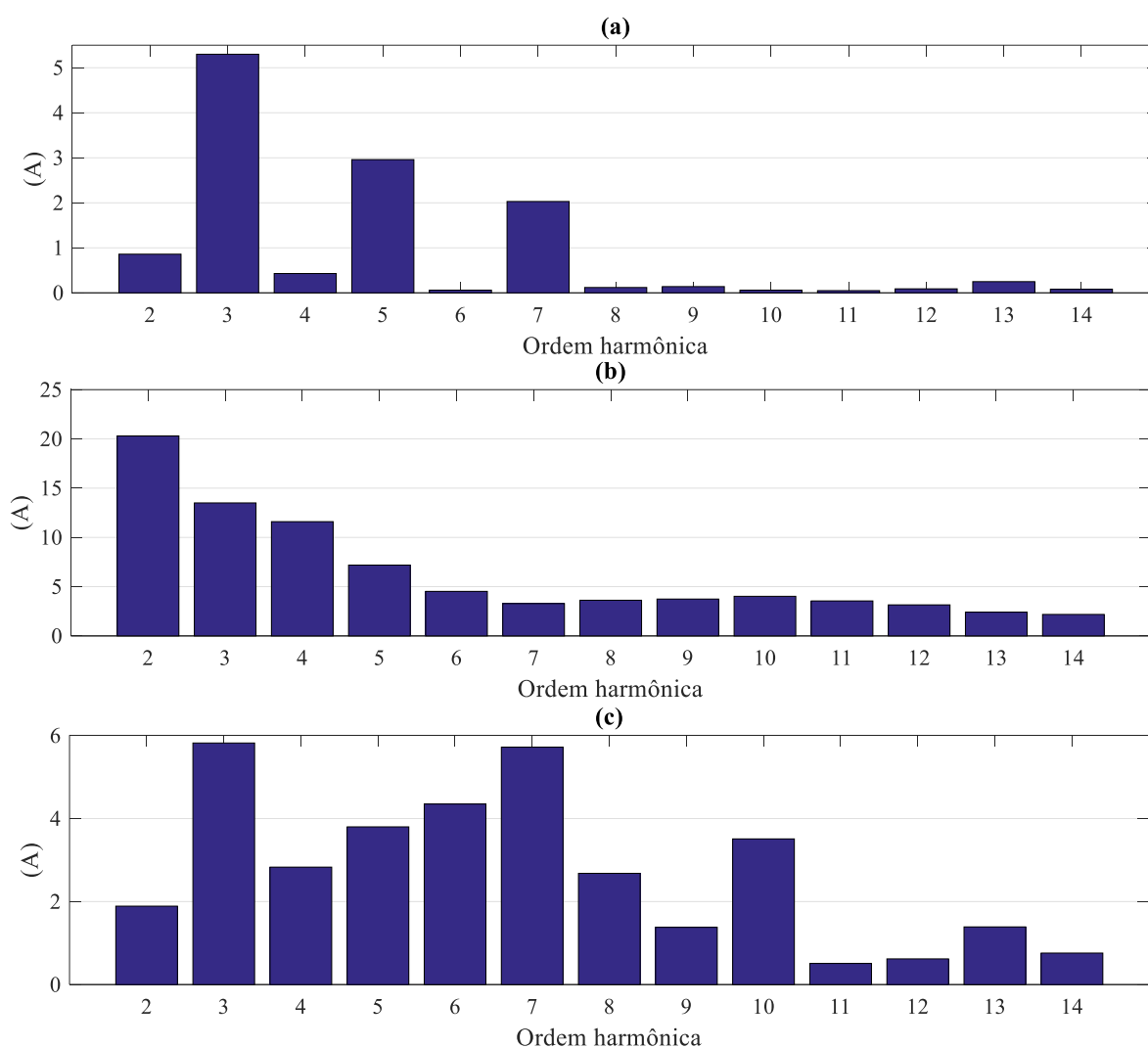
6.3.1 Algoritmo A

O algoritmo desenvolvido por Torres et al. (2014) apresentou, junto com algoritmo E, o maior índice de segurança, conforme mostrado na Figura 6.1. Isto porque o algoritmo não apresentou atuação indevida em nenhum dos casos testados com eventos de chaveamento de capacitor, chaveamento de carga e também religamento de ramal considerando *inrush* de transformador. Uma das lógicas condicionais do algoritmo, responsável por este desempenho, compara a amplitude do terceiro harmônico da corrente com a soma dos harmônicos pares até a 8ª ordem. Esta condição, mostrada na Etapa 5 da subsecção 3.2.1, evita atuações indevidas em casos de *inrush* de transformador. A Figura 6.9 (a) mostra um espectro harmônico de uma FAI com o Modelo 1, a Figura 6.9 (b) mostra o espectro para um chaveamento de ramal considerando *inrush* dos transformadores, e a Figura 6.9 (c) apresenta o espectro de harmônicos para uma FAI com o Modelo 2. Os valores são apresentados em Amperes medidos na fase “A”.

Nota-se que na Figura 6.9 os harmônicos ímpares são muito mais significativos no caso de FAI com o Modelo 1, já para o *inrush*, os harmônicos pares são mais destacados. Esta característica justifica o uso da condição da Etapa 5, pois a soma dos harmônicos pares é maior que o terceiro harmônico para o caso (b) e menor para o caso (a). Porém, esta mesma condição faz com que o algoritmo A não apresente um bom desempenho nos casos de FAI utilizando o Modelo 2, pois a condição da Etapa 5 se mostra *falsa* para o caso (c), uma vez que uma FAI com o Modelo 2 produz harmônicos pares mais elevados em comparação ao caso do Modelo 1.

O espectrograma da Figura 6.9 foi obtido para casos de FAI de Tipo S, simulados na fase “A” e no ponto “D” do sistema teste. Os solos testados foram “grama” (curva VxI (e) da Figura 2.5) para o Modelo 1 e “solo 1” (Tabela 5.1) para o Modelo 2. No caso de chaveamento de transformador, foi utilizado a chave “I” com religamento trifásico.

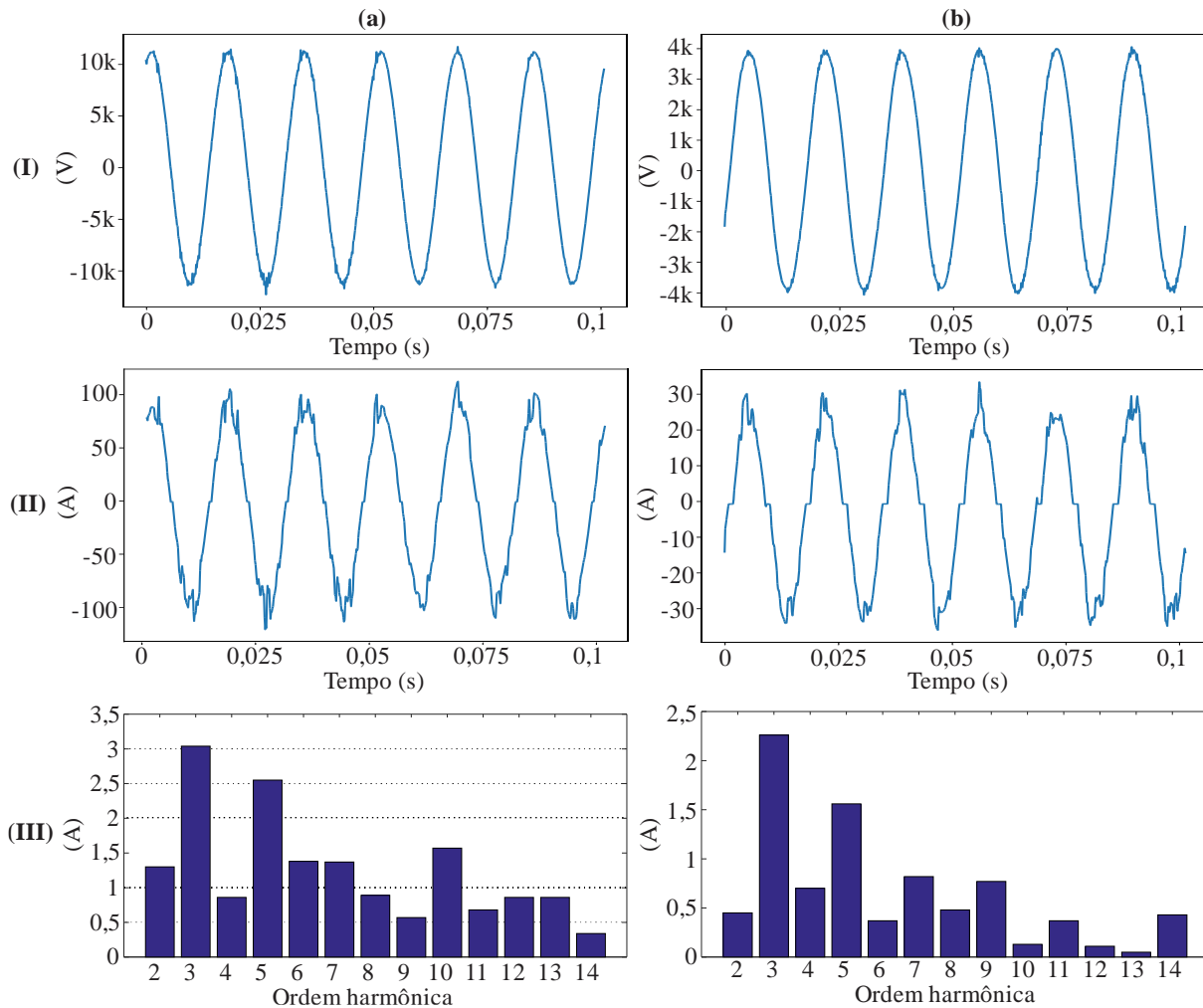
Figura 6.9 – (a) Espectro harmônico para uma FAI com o modelo 1, (b) para um chaveamento de transformador, e (c) para uma FAI com o modelo 2.



Fonte: Autoria própria.

Apesar de o Algoritmo A não detectar a maioria dos casos de FAI utilizando o Modelo 2, analisando a Figura 6.6, observa-se que ocorreu algumas detecções nos casos com FAI do Tipo RLC em testes utilizando o Modelo 2. Isto acontece porque nesses casos a tensão no ponto de falta é menor para as FAI do Tipo RLC, e também pelo fato do Modelo 2 apresentar as mesmas tensões de ruptura do arco elétrico (V_p e V_n) para qualquer tensão no ponto de falta. Esta característica faz com que os harmônicos ímpares sejam mais destacados em relação aos pares nos casos de FAI do Tipo RLC. A Figura 6.10 mostra a tensão em (I), a corrente em (II) e os componentes harmônicas em (III) para uma FAI do Tipo RLF na coluna (a) com uma FAI do Tipo RLC na coluna (b) no mesmo ponto e com as mesmas configurações de solo e de fase.

Figura 6.10 – (I) Tensão no ponto de falta, (II) corrente no ponto de falta, e (III) espectro harmônico da corrente de falta para uma FAI do Tipo RLF na coluna (a) e uma FAI do Tipo RLC na coluna (b), ambas com o modelo 2.



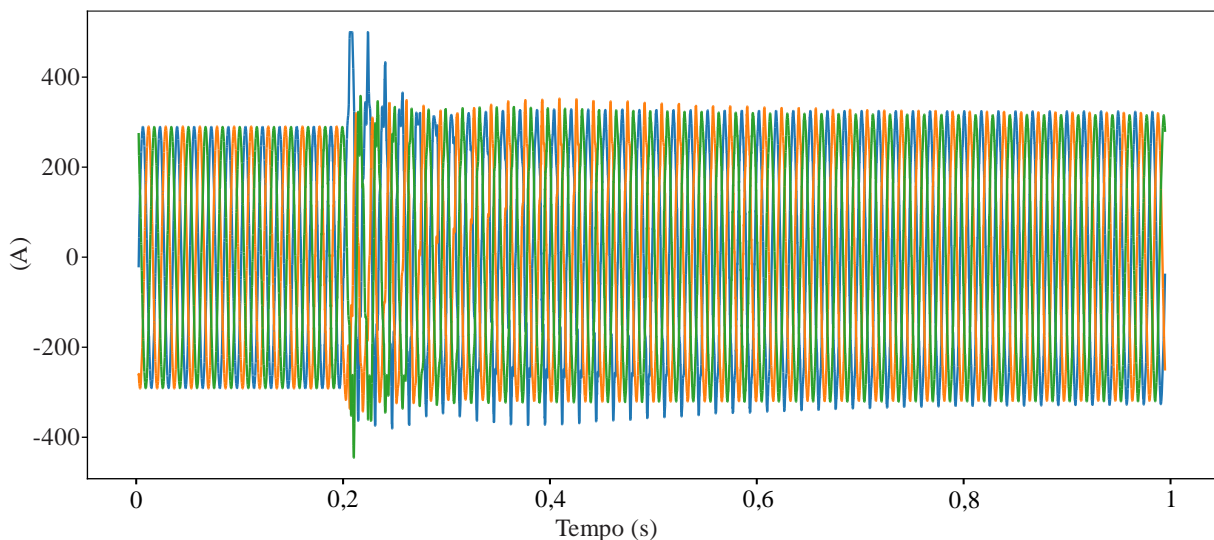
Fonte: Autoria própria.

Na primeira ilustração (I) da Figura 6.10, fica evidente a diferença de amplitude da tensão no ponto de falta entre os tipos de FAI RLF e RLC. Na ilustração (II) tem-se a corrente no ponto de falta, onde, apesar de menor a amplitude para o Tipo RLC, as distorções são maiores, principalmente no cruzamento por zero. Por último, na ilustração (III) da Figura 6.10, o espectro da corrente no ponto de falta é apresentado, onde fica claro que os harmônicos ímpares, principalmente o terceiro harmônico, se destacam em relação aos demais para o caso (b). Devido ao Tipo RLC apresentar o terceiro harmônico mais destacado, a condição da Etapa 5 acaba sendo *verdadeira* para estes casos, levando o algoritmo a detectar diversos casos de FAI do Tipo RLC com o Modelo 2.

Outra observação relevante no algoritmo A, é o tempo de detecção de FAI apresentado nos casos de Religamento com FAI com o Modelo 1. Como mostrado na Tabela 6.7, o tempo

para detecção nestes casos é praticamente 10 vezes maior que o tempo de detecção utilizando somente a FAI do Modelo 1. Apesar do algoritmo ter apresentado um bom desempenho em detecção de FAI para casos utilizando o Modelo 1, este tempo de detecção “elevado” é explicado por as distorções harmônicas presente no *inrush* dos transformadores levarem um certo tempo até se extinguirem. A Figura 6.11 mostra uma oscilografia da corrente nas três fases para um caso de chaveamento de transformador.

Figura 6.11 – Oscilografia das correntes de fase para um chaveamento de transformador.



Fonte: Autoria própria.

Este tempo para estabilização da corrente nas fases faz com que o algoritmo A demore mais para detectar a existência de uma FAI, pois a condição da Etapa 5 não é *verdadeira* até que as distorções harmônicas presentes no *inrush* sejam pequenas o suficiente.

No quesito de classificação de fase, o algoritmo A não conseguiu classificar a fase para FAI do Tipo RLC, porém apresentou um excelente resultado para os casos do Tipo S, RLF e RLFC, não errando em nenhum caso, como mostra a Figura 6.7. Esse resultado se deve a Etapa 8 apresentada na subseção 3.2.1, onde é verificado o THD de cada fase em comparação com o THD médio entre as fases. Como a distorção harmônica é sempre maior na fase em defeito para os tipos S, RLF e RLFC, então a fase em defeito terá sempre o maior THD e conseqüentemente maior que o THD médio.

Em relação a complexidade de execução, o algoritmo se mostrou o mais complexo em nível de processamento, atingindo 28% do uso da CPU do hardware para uma amostragem de 128 amostras por ciclo. O intervalo de execução do algoritmo foi de uma execução por ciclo, porém o algoritmo é flexível para várias execuções dentro de um único ciclo. Um dos fatores

que elevaram muito o consumo da CPU, foram os cálculos de THD utilizado pelo algoritmo.

6.3.2 Algoritmo B

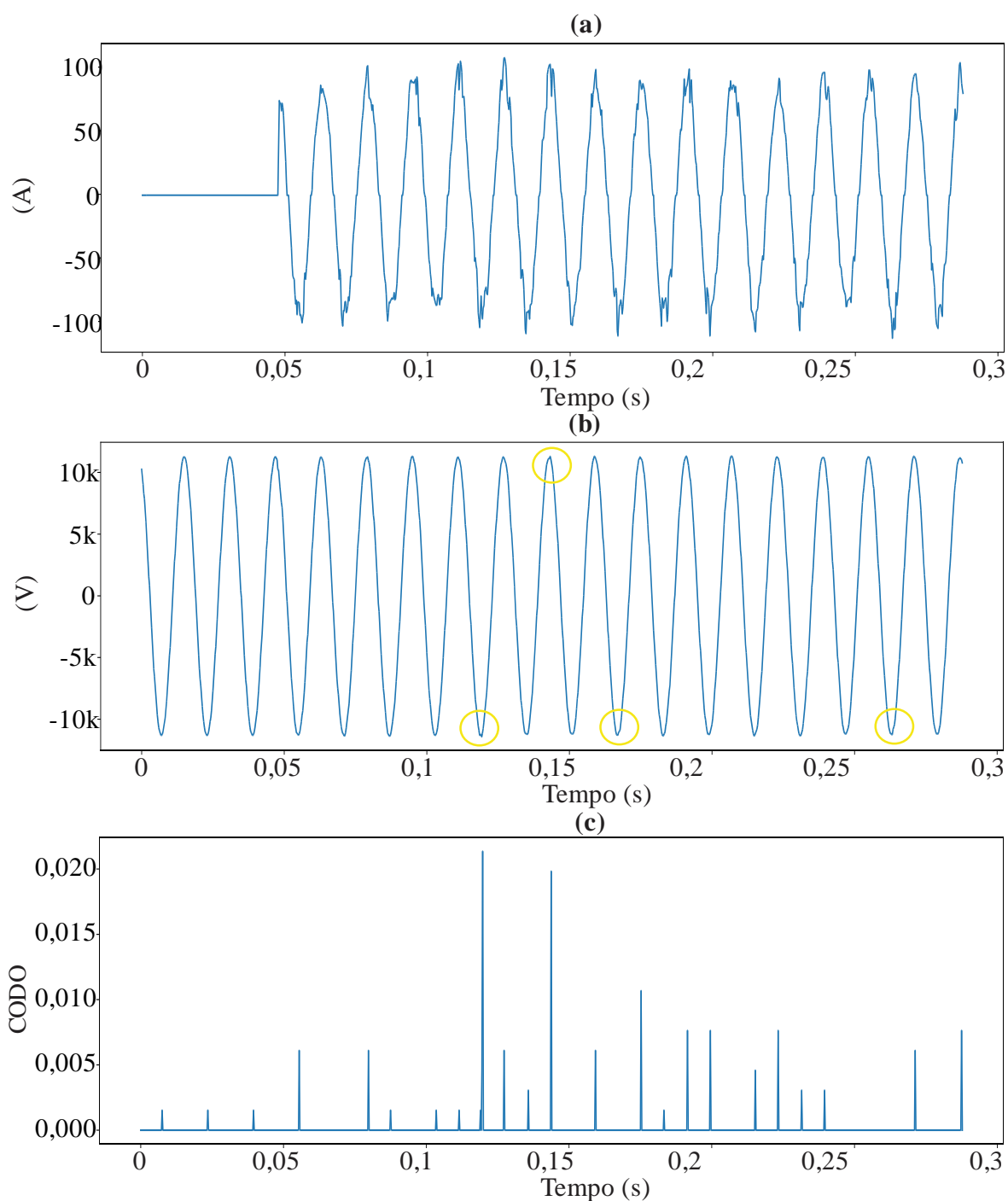
O algoritmo desenvolvido por Gautam e Brahma (2012), apresenta uma abordagem completamente diferente dos demais algoritmos testados. Além de usar a tensão na subestação como fonte de informação, o algoritmo utiliza Morfologia Matemática para extrair informações provenientes de FAI. Tais informações são extraídas pelo filtro morfológico CODO através de pequenas variações que aparecem na forma de onda da tensão. A Figura 6.12 (a) mostra a corrente no ponto de falta para uma FAI do Tipo S com o Modelo 2, já em (b) é apresentado a tensão na subestação para a mesma FAI, e em (c) tem-se a saída do filtro.

Observa-se que a tensão possui pequenos “ruídos” nas marcações amarelas da Figura 6.12 (b). Tais ruídos são resultado da aleatoriedade produzida pelo Modelo 2, uma vez que uma variação aleatória das resistências R_p e R_n e também das tensões V_p e V_n , provocam variações aleatórias na corrente no ponto de falta e, conseqüentemente, nas correntes de fase e na tensão. Assim, estes ruídos característicos das FAI são capturados pelo filtro morfológico e se apresentam em forma de “spikes” na saída do filtro, e que podem ser visualizados na Figura 6.12 (c). Estes spikes sensibilizam o algoritmo B ao ultrapassar um limiar de 0,01, fazendo ele atuar para casos de FAI.

Porém como mostrado na Tabela 6.3, o algoritmo não atuou em nenhum caso de FAI para o Modelo 1, apresentando 0% de disponibilidade. Isto se deve ao fato do Modelo 1 não sensibilizar o filtro CODO. Esta característica pode ser observada na Figura 6.13, onde é mostrado a corrente no ponto de falta em (a), a tensão na subestação em (b) e a saída do filtro CODO em (c) para uma FAI do Tipo S com o Modelo 1. Na Figura 6.13 foi utilizado o solo “solo local” (curva V_{xI} (f) da Figura 2.5), porém o resultado é o mesmo para os demais tipos de solo.

Como mostrado na Figura 6.13 (c), a saída do filtro não provocou “spikes” suficientemente elevados para o caso de FAI em análise. Isto porque o Modelo 1 não utiliza variações randômicas, e sim uma curva V_{xI} característica que é mais suave que a curva V_{xI} gerada pela aleatoriedade do Modelo 2. Esta característica pode ser visualizada na Figura 6.14, onde o caso (a) mostra a curva V_{xI} do solo “solo local” utilizado pelo Modelo 1, e o caso (b) mostra a curva V_{xI} gerado pelo solo 1 do Modelo 2.

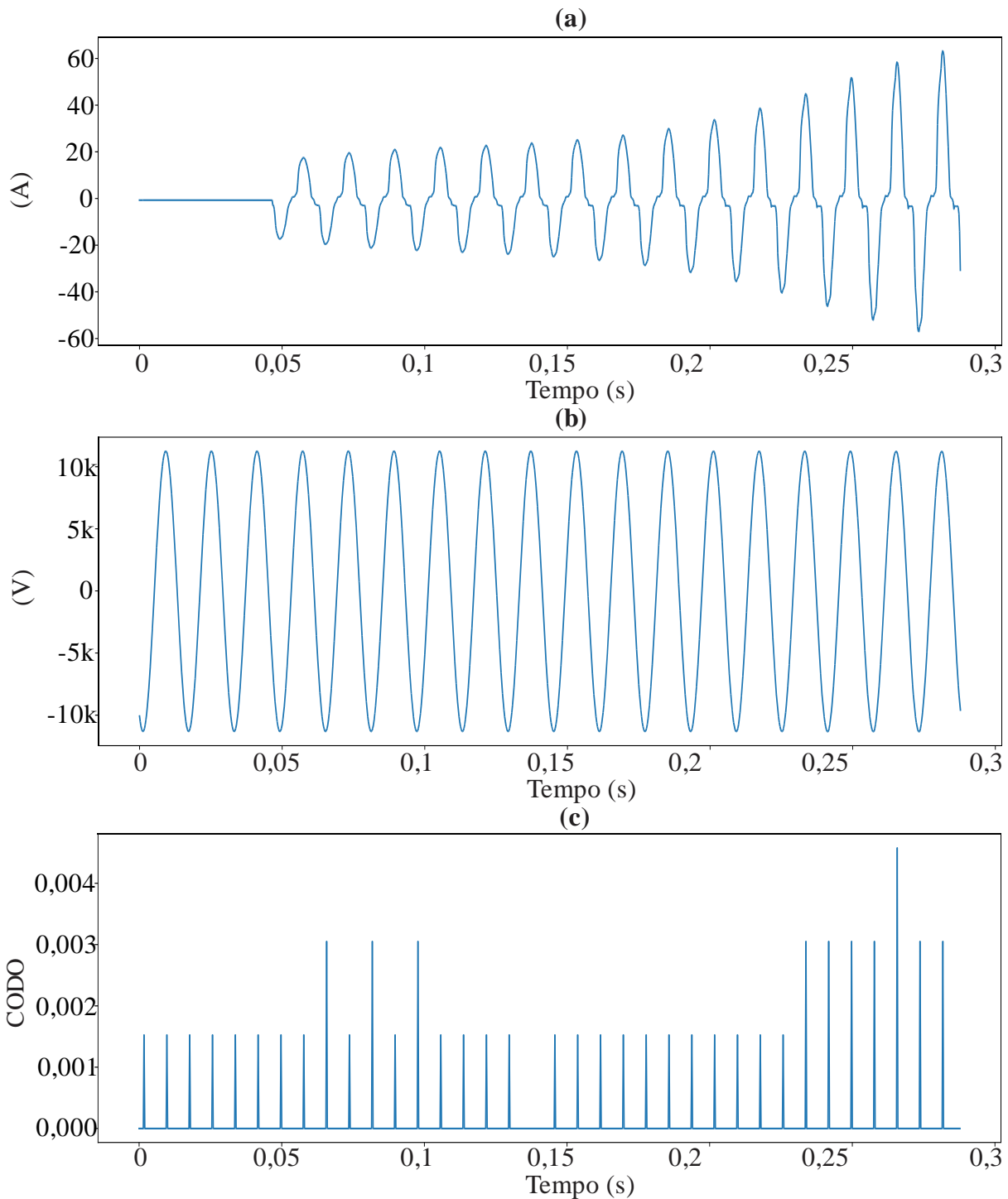
Figura 6.12 – Corrente no ponto de falta em (a), tensão na subestação em (b), e saída do filtro CODO em (c) para uma FAI com o modelo 2.



Fonte: Autoria própria.

Desta forma, o algoritmo B não apresentou detecção para o Modelo 1. No entanto não se pode afirmar que o algoritmo B não apresenta bons resultados para detecção de FAI, pois estes resultados podem ter ocorrido devido ao Modelo 1 não apresentar todas as características decorrentes de uma FAI.

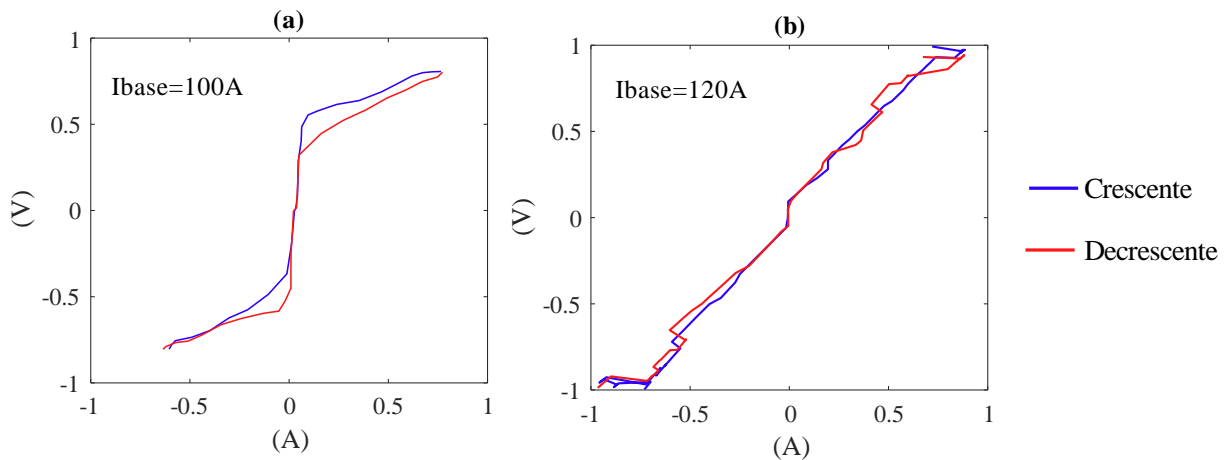
Figura 6.13 – Corrente no ponto de falta em (a), tensão na subestação em (b), e saída do filtro CODO em (c) para uma FAI com o modelo 1.



Fonte: Autoria própria.

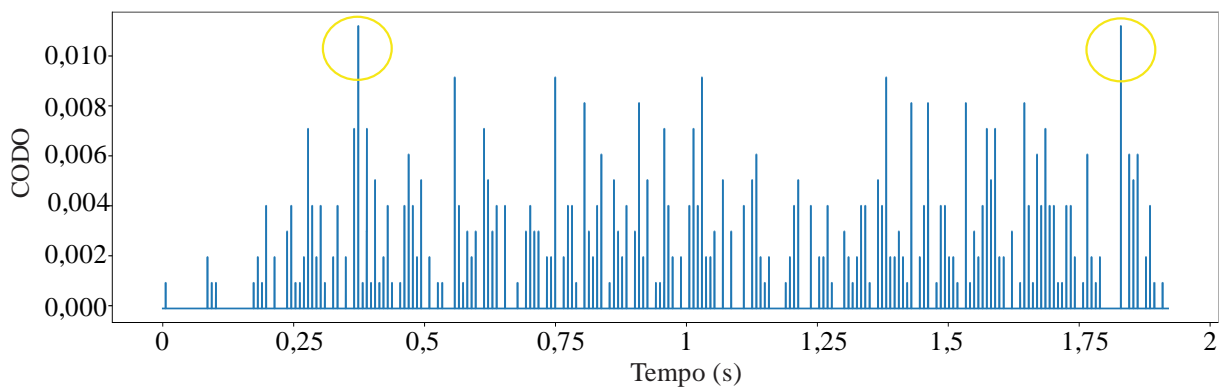
Outro aspecto relevante sobre o algoritmo B, é o tempo de detecção de FAI mostrado na Tabela 6.7. Apesar do algoritmo prever um tempo máximo de detecção de 1 segundo, conforme fluxograma da Figura 3.1, o algoritmo apresentou um tempo médio de detecção superior a este valor. Isto porque em certos casos de FAI os “spikes” gerados pelo CODO

Figura 6.14 – Curva $V \times I$ para uma FAI com modelo 1 em (a), e para uma FAI com modelo 2 em (b).



Fonte: Autoria própria.

Figura 6.15 – Saída do CODO para um caso de FAI onde a detecção levou mais de 1 segundo.



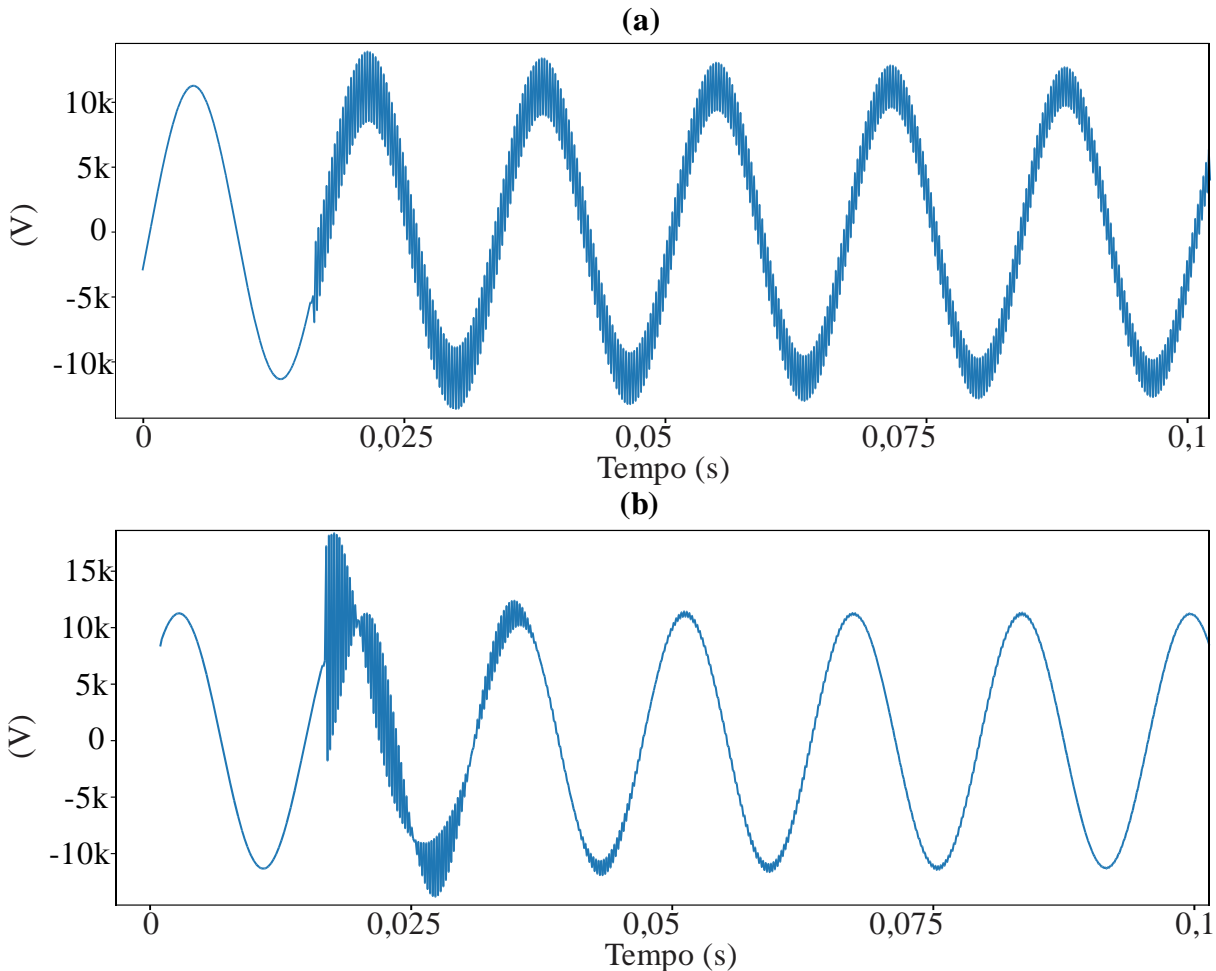
Fonte: Autoria própria.

ficaram muito espaçados devida as distorções na tensão serem praticamente inexistentes em casos onde a FAI é mais distante da subestação. A Figura 6.15 mostra um caso onde o CODO obteve spikes com espaçamento maior que 1 segundo.

Este espaçamento maior que 1 segundo mostrado na Figura 6.15 causa o *reset* no algoritmo B, fazendo ele demorar mais tempo para detectar uma FAI.

Também se observou que este algoritmo é sensível para oscilações numéricas que ocorrem em certos casos nos simuladores. Tais oscilações são provocadas principalmente por aberturas de chaves ou disjuntores (OROZCO et al, 2013). Segundo Orozco et al. (2013) a inserção de um circuito RC (também chamado “*snubber*”) de alto valor em paralelo a tais chaves e disjuntores minimizam o problema de oscilações numéricas. Esta solução foi utilizada nos Modelos 1 e 2 de FAI ao verificar atuações indevidas do algoritmo B devido a este

Figura 6.16 – Oscilações numéricas ocasionadas devido a um rompimento de cabo.



Fonte: Autoria própria.

problema. A Figura 6.16 (a) mostra o que acontece com a tensão na subestação para a ruptura de um cabo na fase “A” sem a utilização do *snubber*, já a Figura 6.16 (b) mostra a mesma tensão quando se utiliza desta solução. Nota-se que a partir do rompimento do cabo, que acontece no tempo 0,015s, uma oscilação aparece na tensão, esta oscilação permanece por vários segundos ou até mesmo minutos quando não é utilizado o *snubber*. Porém quando utilizado, estas oscilações duram poucos ciclos, como mostrado no caso (b).

No quesito de processamento, apesar de o algoritmo possuir um equacionamento simples quando comparado aos demais, o nível de processamento exigido do hardware foi de 21% da CPU. Isso se deve ao fato de o algoritmo necessitar ser executado a cada amostragem, ou seja, no caso do algoritmo B, 64 execuções dentro do mesmo ciclo de rede. O ponto negativo para este tipo de algoritmo é que não pode ser realizado uma execução flexível, ou seja, não pode ser alterado o intervalo de execução quando o uso da CPU está elevado devido a outras funções que estão rodando simultaneamente no processador.

6.3.3 Algoritmo C

O algoritmo desenvolvido por Lima (2016) apresentou resultados muito bons nos testes realizados em ambos os modelos de FAI. Porém, é importante destacar, que foram feitas algumas adaptações neste algoritmo. A primeira delas é o tempo mínimo para detecção de FAI, onde se percebeu, através de simulações, que o tempo de 83 ms para detecção de FAI é muito pequeno, acarretando em atuações indevidas para chaveamento de banco de capacitores. Assim, essa temporização foi modificada para 200 ms, resolvendo o problema de atuação indevida nos chaveamentos de capacitor.

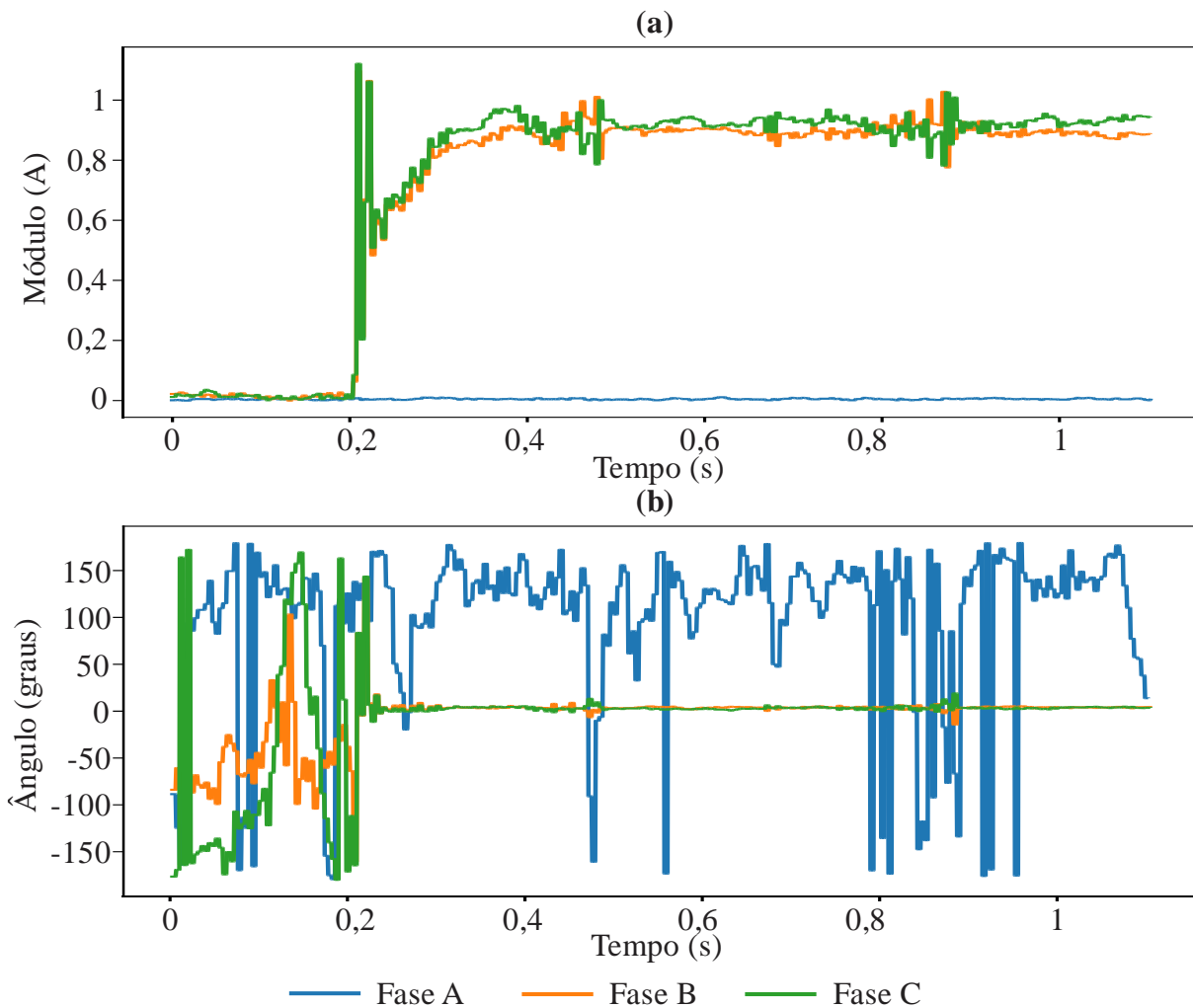
Outra condição que foi ajustada é a análise do ângulo de terceiro harmônico, mostrado no fluxograma da Figura 3.2. Analisando o fluxograma nota-se que a condição de ângulo de terceiro harmônico se dá sem restrição de amplitude, o que provoca atuações indevidas em condições normais e também atuações em todas as fases nos casos de FAI. Isto porque o ângulo de terceiro harmônico flutua em valores aleatórios quando a amplitude do seu fasor é pequena, não conseguindo assim, estabelecer um valor para o ângulo. Assim, foi adicionado uma restrição de amplitude do fasor de terceiro harmônico de mesmo limiar L_3 , resolvendo o problema de atuação indevida e também classificação errônea.

Além destas duas alterações, o algoritmo também foi testado utilizando componentes harmônicas extraídas de uma FFT de ciclo completo, e não de uma STFT como proposta pela autora do algoritmo.

Apesar do algoritmo C apresentar um bom desempenho para detecção de FAI em ambos os modelos, os casos de FAI com o Tipo RLC foram um ponto fraco do algoritmo. Para este tipo de FAI o método detectou apenas 25% dos casos no Modelo 1 e 50% no Modelo 2. Um dos fatores que não sensibilizaram o algoritmo nestes casos, é o ângulo de terceiro harmônico, o qual tende a ficar em fase com a tensão da fase sob defeito, ou seja, possuir um ângulo próximo de 0° devido a tensão no ponto de falta ser dependente da ligação delta dos transformadores da rede. A Figura 6.17 (a) mostra o módulo de terceiro harmônico nas três fases, medidas na subestação, e na Figura 6.17 (b) o ângulo de terceiro harmônico em cada uma das fases quando se aplica uma FAI do Tipo RLC na fase “A” no instante 0,2s.

Observando a Figura 6.17, percebe-se que o ângulo do terceiro harmônico na fase “A” fica instável, devido a amplitude ser muito pequena deste harmônico na fase “A”. Já o ângulo referente as fases “B” e “C” ficam próximo de 0° , o que leva o algoritmo C a não atuar por ângulo de terceiro harmônico, podendo somente atuar por amplitude, o que em muitos casos de

Figura 6.17 – Módulo em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase para uma FAI do Tipo RLC.

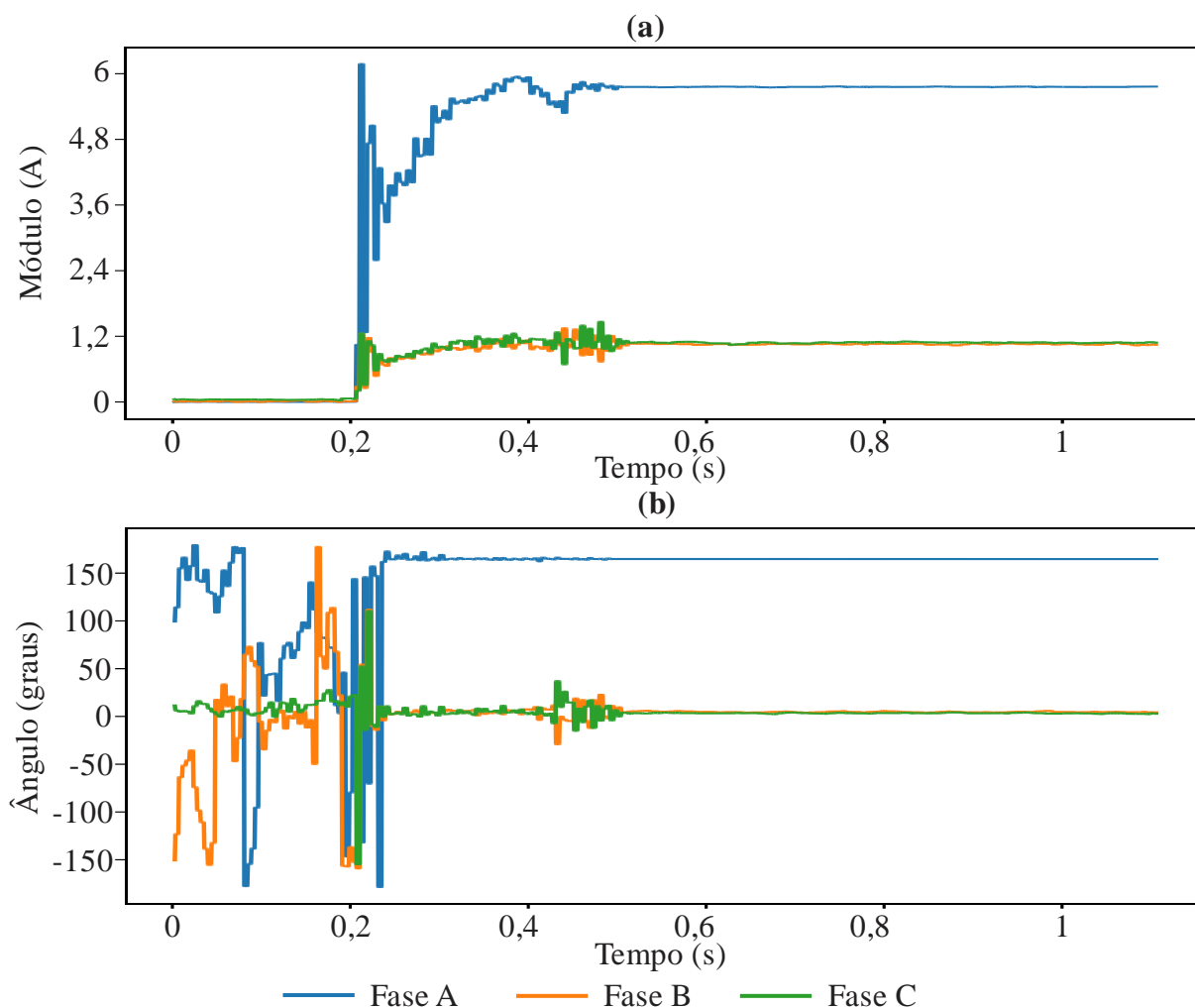


Fonte: Autoria própria.

FAI do Tipo RLC não ocorre, pois a amplitude de terceiro harmônico nas fases são pequenas em sua maioria.

Um dos pontos fortes do algoritmo é o tempo de detecção de FAI, sendo o algoritmo mais rápido entre os testados. Em contrapartida, o método não obteve um desempenho satisfatório nos testes de classificação da fase. Isto porque o algoritmo possui um ajuste de terceiro harmônico consideravelmente baixo, levando até mesmo o algoritmo a atuar nas fases indevidamente. Isto ocorre, principalmente, em casos de FAI do Tipo RLFC, que são casos onde as fases são afetadas por maior influência dos componentes harmônicos presentes na FAI. No entanto, uma elevação deste limiar de terceiro harmônico provocaria a redução do desempenho do algoritmo, reduzindo o seu índice de disponibilidade. A Figura 6.18 mostra a amplitude do terceiro harmônico nas três fases para uma FAI do Tipo RLFC na fase “A”. Onde se percebe que o terceiro harmônico é elevado nas três fases, ocasionando assim atuações indevidas nas

Figura 6.18 – Módulo em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase para uma FAI do Tipo RLFC.



Fonte: Autoria própria.

fases são para alguns tipos de solo, e, conseqüentemente, confundindo a classificação de fase.

O uso da CPU para este algoritmo foi de 17% considerando uma amostragem de 128 amostras por ciclo de rede e um intervalo de execução de um ciclo. No entanto, o algoritmo é flexível, e pode ser executado várias vezes por ciclo.

6.3.4 Algoritmo D

O algoritmo desenvolvido por Subramanian e Venkataraman (2012) se mostrou eficiente e consistente sob testes com os dois modelos de FAI. Porém teve dificuldade em detectar certos casos de FAI envolvendo o solo do tipo “asfalto” e “areia” do Modelo 1. Isto porque estes tipos de solo possuem uma corrente de FAI de baixa magnitude e quando somada

à corrente proveniente das cargas monofásicas, a corrente medida no neutro pode ficar ainda menor dependendo da fase em que foi efetuada a FAI. A Figura 6.19 mostra a corrente de neutro em um comparativo entre a aplicação de uma FAI com solo “asfalto” em diferentes fases da rede.

Na Figura 6.19, é mostrado uma FAI do Tipo S no local B do sistema teste com o solo “asfalto” na fase “A” em (a), na fase “B” em (b) e na fase “C” em (c). Percebe-se que após a inserção da FAI, a corrente de neutro muda. No caso (c), a corrente foi reduzida e o algoritmo D não consegue detectar a FAI devido sua lógica construtiva. Esta redução na corrente de neutro ocorre quando os fasores de primeiro harmônico da corrente de FAI e da corrente de neutro, proveniente das cargas, possuem um ângulo praticamente oposto. A soma destes fasores resulta em um fasor de menor amplitude. Nos demais solos testados, essa redução do fasor não acontece devido a corrente de FAI ser muito maior que a corrente de neutro proveniente das cargas.

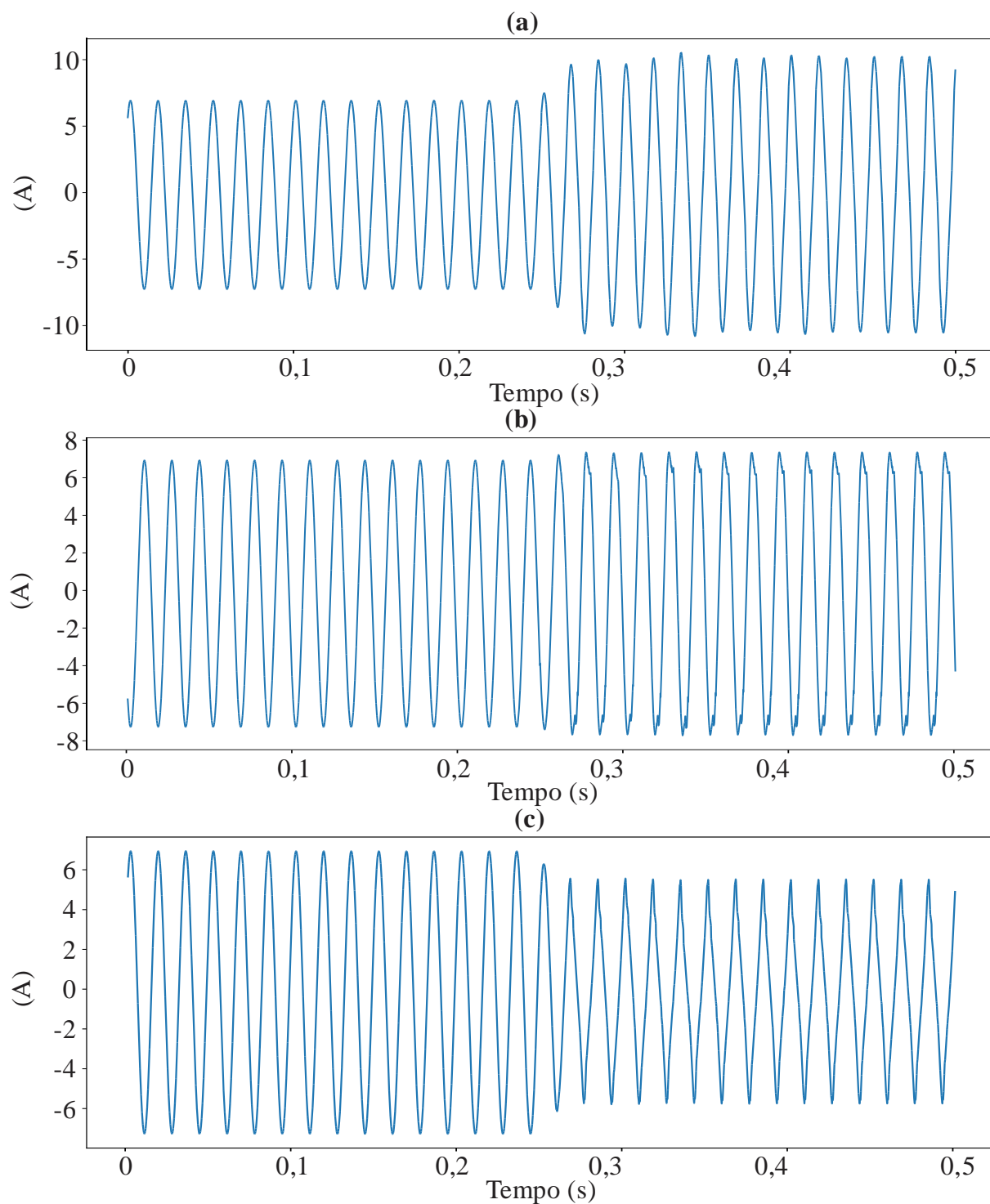
Em simulações com a configuração de solo 1 (Tabela 5.1) do Modelo 2, o algoritmo D também se mostrou ineficiente. Porém neste caso, mesmo esse tipo de solo 1 tendo apresentado altas correntes de FAI, o percentual de terceiro harmônico é inferior para esta configuração de solo, sendo insuficiente para sensibilizar o algoritmo. Esta característica está associada a tensão de ruptura do modelo (V_p e V_n), devido tais parâmetros serem inferiores para a configuração de solo 1. A Figura 6.20 mostra a corrente no ponto de falta e seu espectro harmônico em porcentagem para uma simulação com os quatro tipos de solo do Modelo 2, porém, R_p e R_n são considerados fixos com um valor de 100Ω , de modo a observar a influência apenas de V_p e V_n .

Observando a Figura 6.20, percebe-se como os valores de V_p e V_n afetam a o nível espectral da FAI, fazendo o percentual de harmônicos ser inferior para o solo 1. Essa mudança espectral, se deve ao tamanho dos “gaps” que estão presentes no cruzamento por zero da corrente. Com isso, o percentual de terceiro harmônico é afetado, o que faz com que o algoritmo D não atue corretamente para o solo 1, quando aplicada uma FAI do Tipo S e RLF.

Outro aspecto, e que reduziu o nível de segurança do algoritmo, é a detecção indevida para casos de *inrush* de transformador. Porém, ao contrário dos algoritmos B e C, o algoritmo D somente atuou de forma indevida para casos de *inrush* monofásico, pois nos transformadores trifásicos não há corrente de terceira harmônica circulando no neutro.

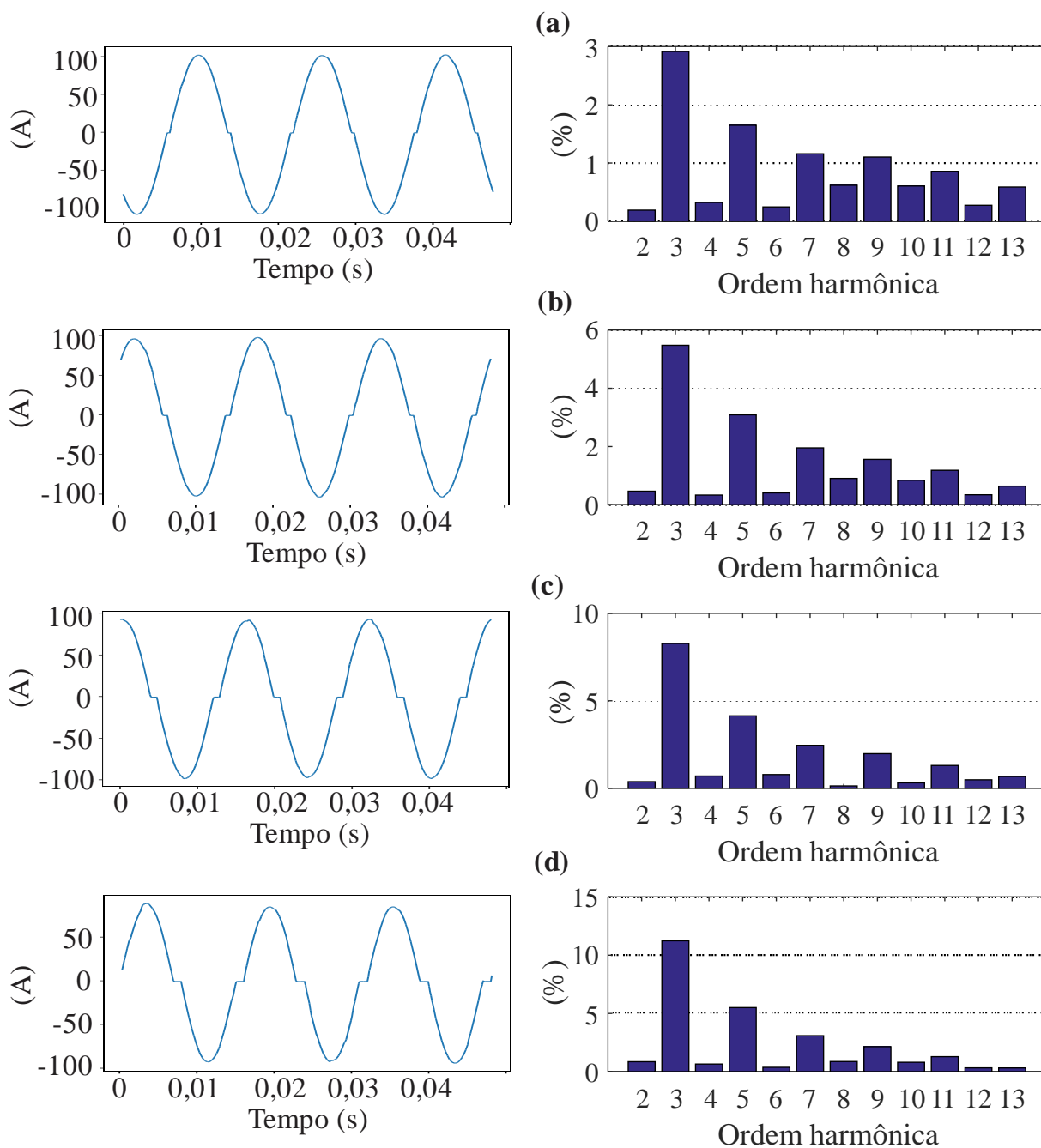
Devido ao algoritmo utilizar apenas a corrente de neutro na sua tomada de decisão, o nível de processamento requerido foi de apenas 10%, considerando uma amostragem de 128 amostras por ciclo e um intervalo de execução de um ciclo.

Figura 6.19 – Corrente de neutro para uma FAI do Tipo S na fase “A” em (a), na fase “B” em (b), e na fase “C” em (c).



Fonte: Autoria própria.

Figura 6.20 – Corrente no ponto de FAI e percentual harmônico para o solo 1 em (a), solo 2 em (b), solo 3 em (c), e solo 4 em (d).



Fonte: Autoria própria.

6.3.5 Algoritmo E

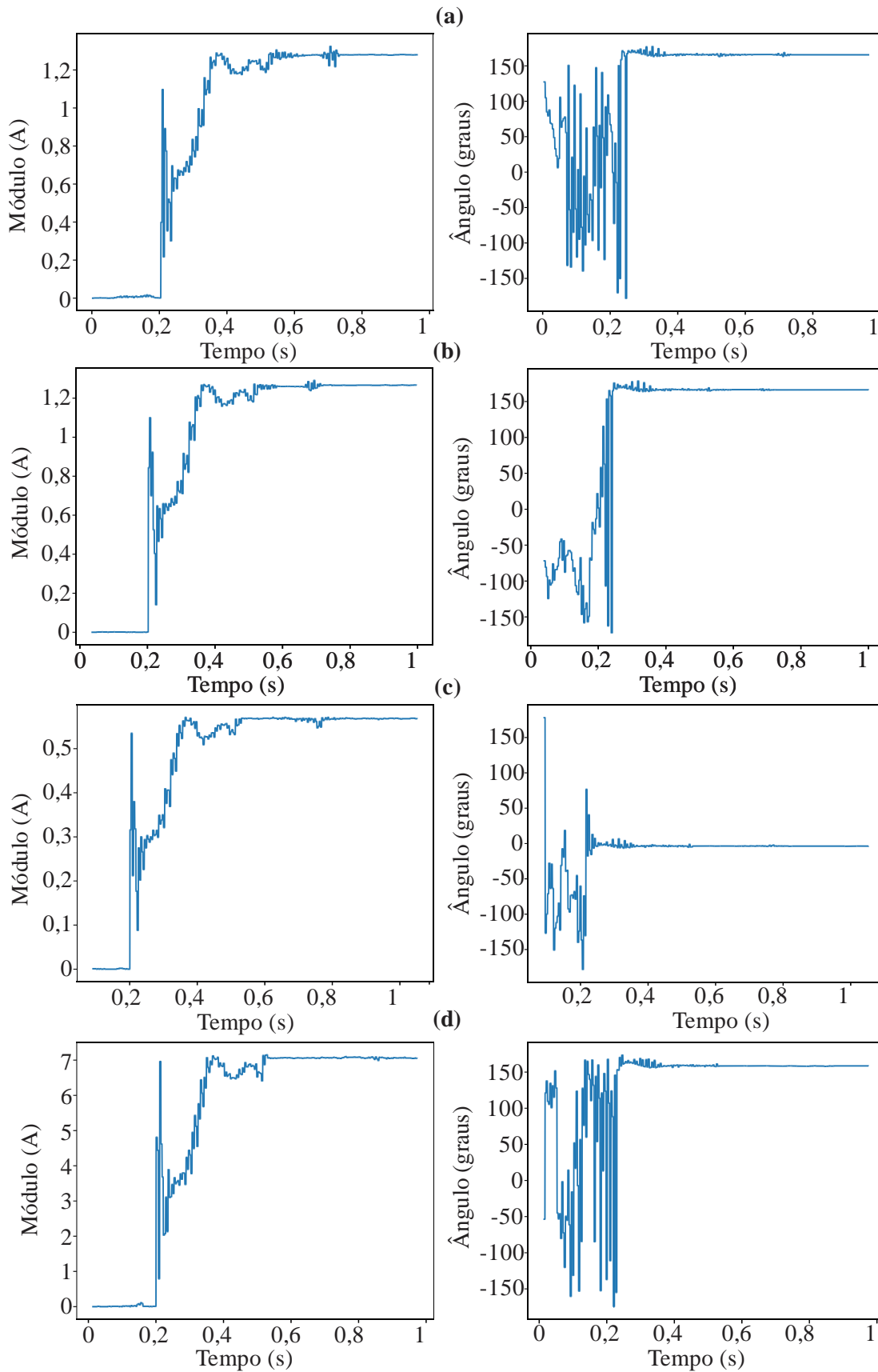
O algoritmo desenvolvido neste trabalho apresentou o melhor resultado tanto para detecção como para a classificação em relação aos demais. Um item que foi destaque para a boa performance do algoritmo foi o Detector de Rompimento de Cabo. Utilizando este detector, foi possível detectar casos de FAI que nenhum dos outros métodos testados detectaram. Os principais casos que este detector fez a diferença foi os casos de FAI do Tipo RLC. Isto porque, como explicado no algoritmo C, o ângulo do terceiro harmônico fica completamente diferente em casos de FAI do Tipo RLC em relação aos demais casos de FAI. Isso faz com que o Critério 4 do fluxograma da Figura 4.4 seja *falso*, ficando o Critério 5 como responsável pela detecção de FAI. Para compreender melhor, a Figura 6.21 mostra a amplitude e o ângulo do terceiro harmônicos para os 4 tipos de FAI medidos na corrente de neutro.

Percebe-se que o ângulo do terceiro harmônico do caso (c) não se enquadra no Critério 4 do algoritmo (vale lembrar que este ângulo está referenciado à fase “A”, que é a referência utilizada pelo método). Nestes casos, a detecção só é possível devido ao Detector de Rompimento de Cabo.

Nos demais tipos de FAI o ângulo é próximo de 180° . Esta característica do ângulo também é observada para os demais tipos de solo, inclusive os solos do Modelo 2. A Figura 6.22 mostra a amplitude e o ângulo de terceiro harmônicos para FAI do Tipo S em diferentes superfícies do Modelo 1 e do Modelo 2. Os tipos de solos citados na Figura 6.22 para o Modelo 1 são: areia, asfalto, cascalho, grama, paralelepípedo e solo local, tais são citados como solos de 0, 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

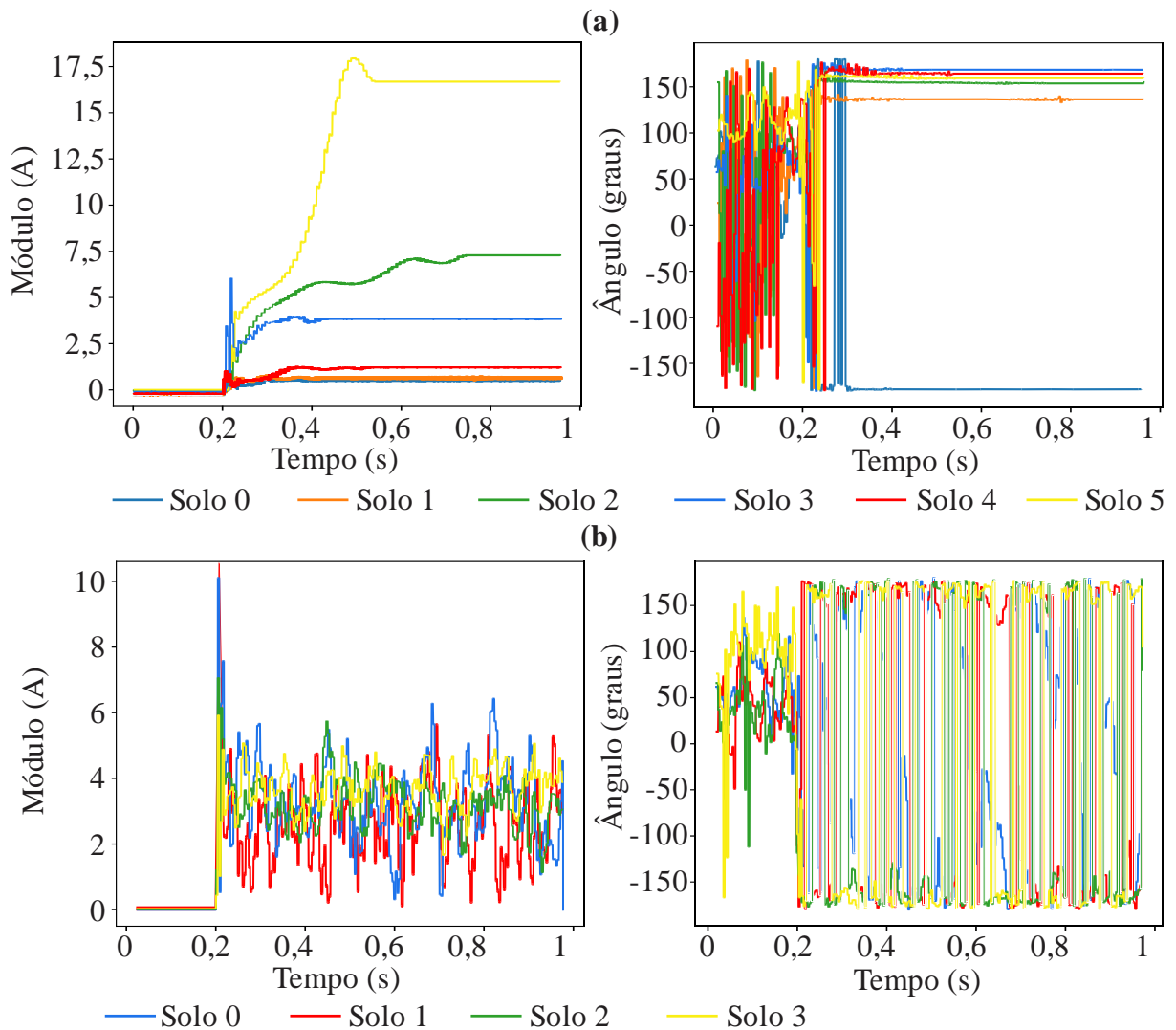
Nota-se que a característica de ângulo próximo a 180° é pertinente nos casos de FAI, o que confirma o que foi afirmado por Liu et al. (2016). Porém na Figura 6.22 (b), o módulo de terceiro harmônico, assim como o ângulo, oscila ao longo do tempo. Esta característica se dá devido o Modelo 2 possuir características aleatórias.

Figura 6.21 – Amplitude e ângulo de terceiro harmônico para uma FAI do Tipo S em (a), Tipo RLF em (b), Tipo RLC em (c), e do Tipo RLFC em (d).



Fonte: Autoria própria.

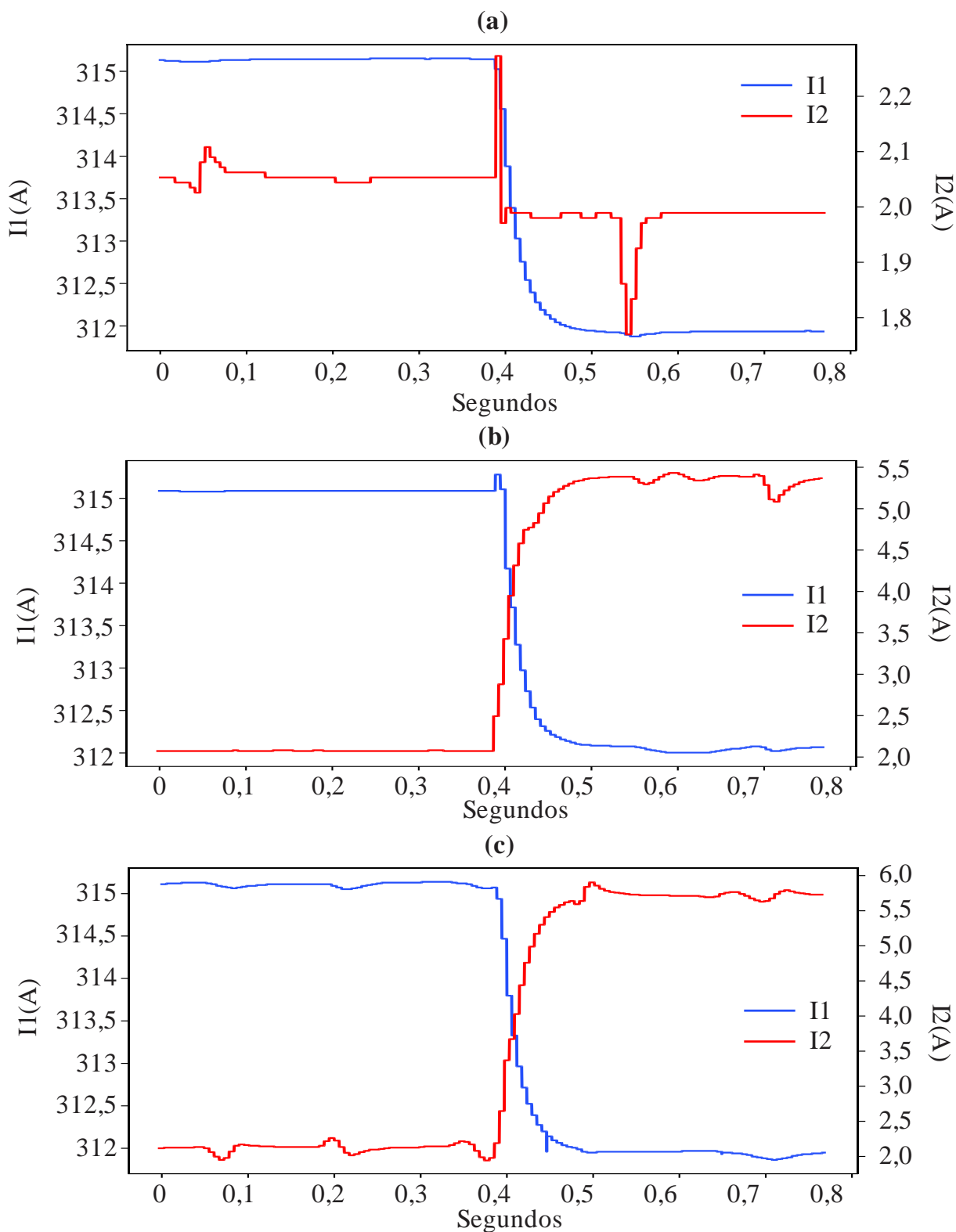
Figura 6.22 – Amplitude e ângulo de terceiro harmônico para uma FAI do Tipo S em diferentes superfícies do modelo 1 em (a) e do modelo 2 em (b).



Fonte: Autoria própria.

Apesar de o Detector de Rompimento de Cabo ser decisivo em todos os casos de FAI do Tipo RLC, ele não detectou a ruptura do cabo em simulações na fase “A” no local “C”. Isto porque um rompimento na fase “A” neste local não provoca aumento de desequilíbrio na corrente do sistema, criando um ponto “cego” para o Detector de Rompimento de Cabo. A Figura 6.23 mostra o que acontece com as componentes simétricas de sequência positiva (em azul) e negativa (em vermelho) quando ocorre um rompimento de cabo (no instante 0,4) na fase “A” em (a), na fase “B” em (b) e na fase “C” em (c).

Figura 6.23 – Componentes de sequência positiva em azul e sequência negativa em vermelho para um rompimento de cabo no local “C” nas fases: “A” em (a), “B” em (b), e “C” em (c).



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 6.23, percebe-se que no caso (a), ou seja, um rompimento na fase “A”, que a sequência negativa (I_2) diminui após o rompimento do cabo, levando o algoritmo

Detector de Rompimento de Cabo a não detectar o rompimento, e conseqüentemente, a não detecção de FAI para casos do Tipo RLC neste local. Esta redução de I2 para o caso (a) ocorre devido ao alimentador possuir ramais monofásicos predominantes na fase “A”, ou seja, a corrente na fase “A”, em condições normais de funcionamento, possui uma amplitude levemente superior que as demais fases. Assim, ao romper o cabo da fase “A” no local “C”, ocorrerá uma redução da corrente nesta fase, de modo que, a amplitude da corrente resultante seja mais próxima das demais fases, reduzindo o desequilíbrio do sistema e conseqüentemente, reduzindo I2.

Este caso de redução no desequilíbrio do sistema após um rompimento de cabo pode acontecer em vários locais do alimentador, sendo o número de “pontos cegos”, ou locais onde o Detector de Rompimento de Cabo não irá atuar, é proporcional ao desequilíbrio do sistema. Quanto maior o desbalanço das corrente do sistema, maior é a chance de um rompimento de cabo reduzir I2. No entanto, a maioria dos pontos do alimentador, como os locais “A”, “B”, “D” e “E”, não causam este efeito com um rompimento de cabo na fase “A”, pois a perda de carga é significativa, levando a um aumento no desequilíbrio do sistema.

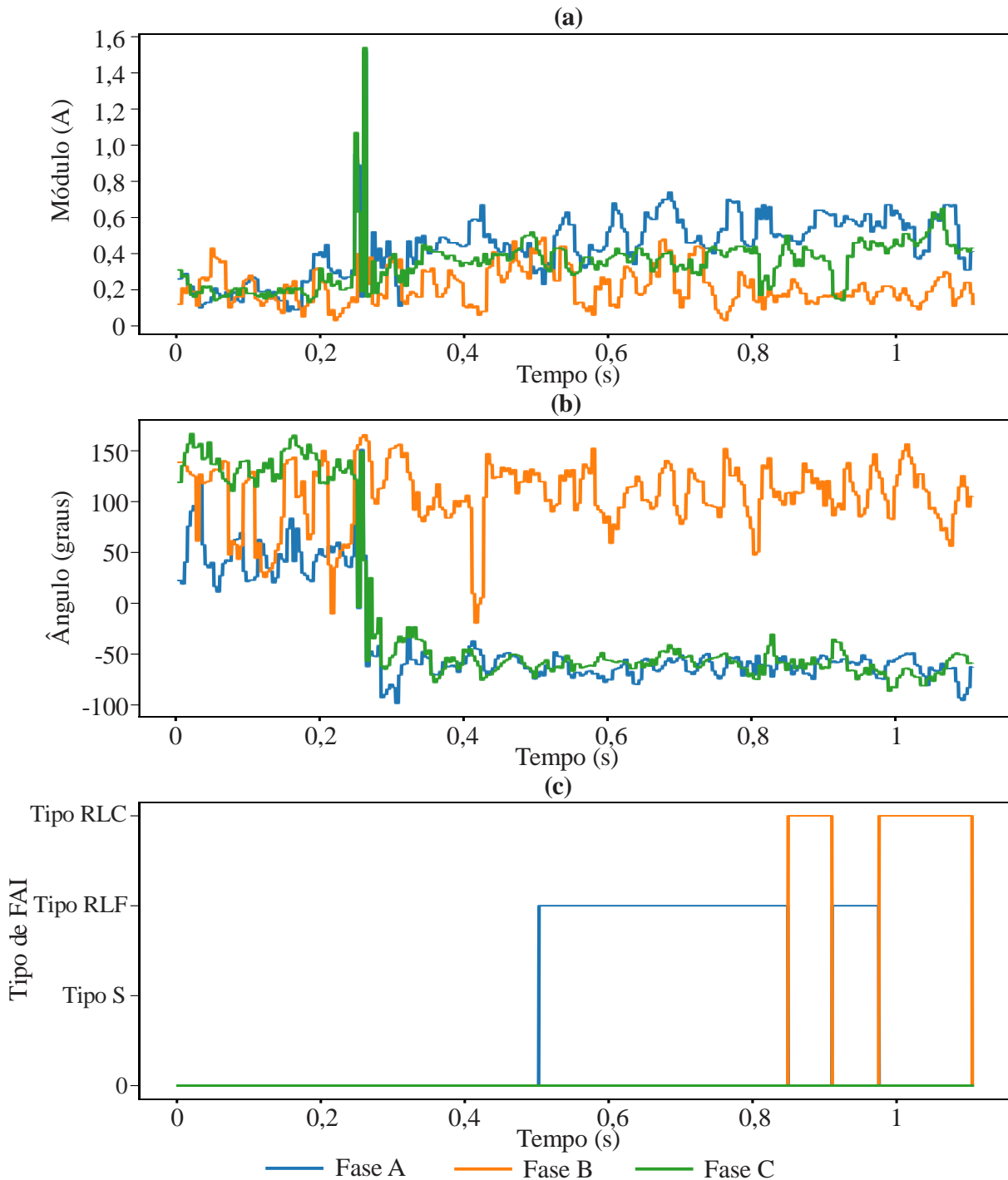
Outro caso que o algoritmo não conseguiu detectar, foi em FAI do Tipo S com o solo 1 do Modelo 2. Assim como o algoritmo D, o método desenvolvido não detectou as FAI neste cenário devido a porcentagem de terceiro harmônico ser inferior a 3%, como mostra a Figura 6.20 (a).

Assim como o algoritmo A, o algoritmo proposto E também apresentou o melhor resultado no quesito de segurança, isto porque, não ocorreu nenhum caso de atuação indevida. O Critério 3 do fluxograma do algoritmo é o responsável por evitar atuações indevidas nos casos de *inrush* de transformador. Porém, diferentemente do algoritmo A, utilizou-se a comparação dos harmônicos ímpares com os harmônicos pares e não o terceiro harmônico com os harmônicos pares, o que não prejudica a atuação do algoritmo nos casos do Modelo 2.

Uma abordagem diferente no algoritmo E, foi a forma de incremento do TIMER. Esta forma de incremento evita que o algoritmo entre em *reset*, ou seja, retoma ao estado de FLAG=0, principalmente em casos utilizando o Modelo 2. Nestes casos as variações aleatórias dos componentes harmônicos podem fazer com que os critérios adotados pelo algoritmo sejam *falsos* mesmo em casos de FAI. A não utilização desta forma de incremento do TIMER provocaria um aumento no tempo de detecção de FAI nos casos mais sensíveis, principalmente os casos os envolvendo o Modelo 2. Além disso acarretaria em não detecção de FAI para alguns casos envolvendo o Modelo 2, pois a Etapa 2 do algoritmo perderia o valor pré-falta dos componentes harmônicos, tornando a detecção mais difícil.

Quanto a classificação de fase, o algoritmo teve um excelente resultado. Porém alguns casos de FAI do Tipo RLC o algoritmo não conseguiu distinguir nem a fase e nem o tipo de FAI. Nestes casos a classificação foi inconclusiva, o que pode ser visualizado na Figura 6.24 onde em (a) tem-se a amplitude de terceiro harmônico nas três fases, em (b) o ângulo de terceiro

Figura 6.24 – Amplitude em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase. Em (c) tem-se a saída do classificador de fase e de tipo de FAI.



Fonte: Autoria própria.

harmônico para as três fases, e em (c) a saída do classificador de fase e tipo de FAI. A figura representa um caso de FAI do Tipo RLC, na fase B”, no local “D”, com solo do tipo “areia”.

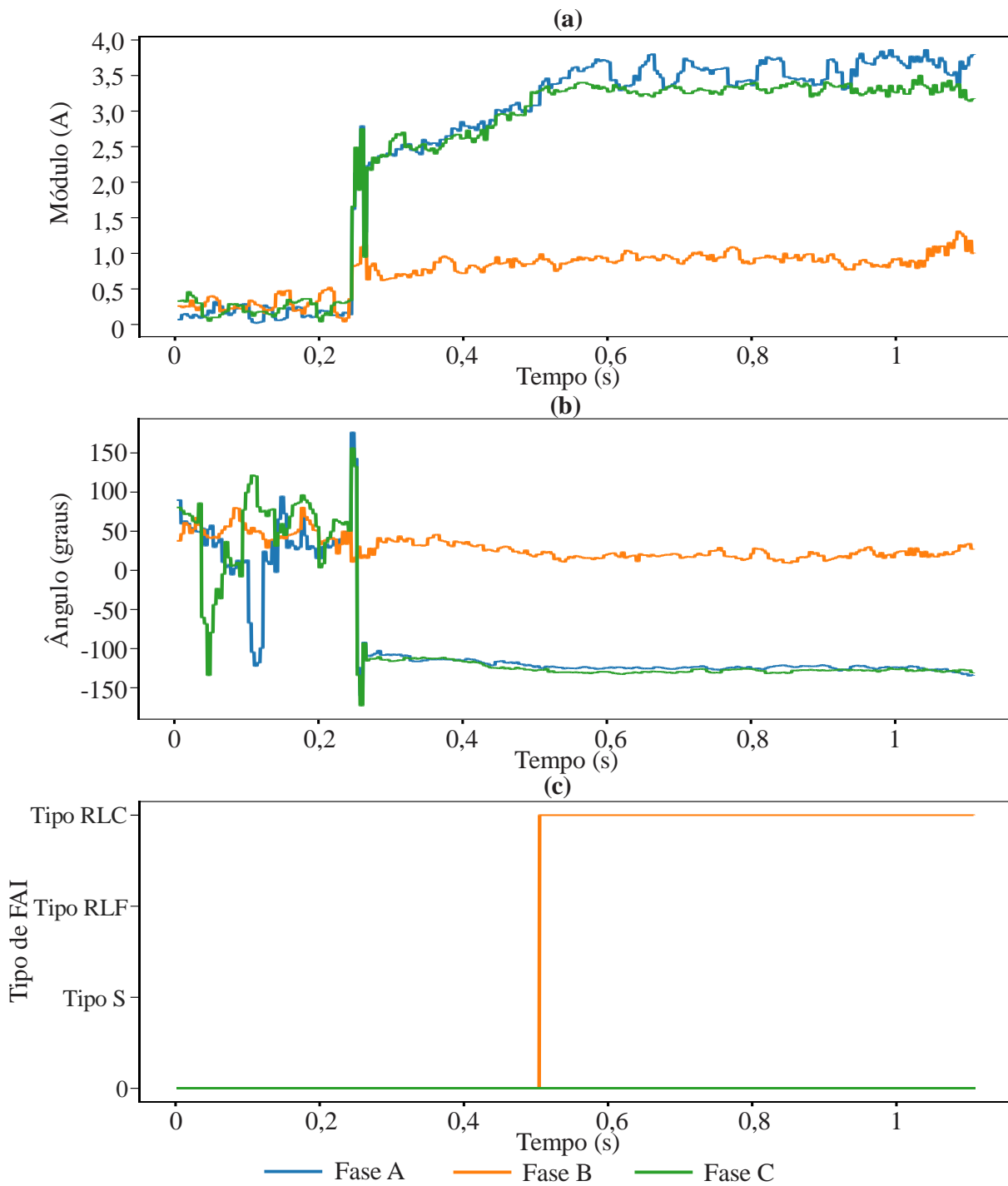
Devido à baixa amplitude do terceiro harmônico, observado na Figura 6.24 (a), o ângulo de terceiro harmônico acaba oscilando muito ao longo do tempo, o que dificulta a classificação de fase e também do tipo de FAI. A saída do classificador é mostrada na Figura 6.24 (c), onde inicialmente é detectado uma FAI do Tipo RLF na fase “A”, e logo depois uma FAI do Tipo RLC na fase “B”. Neste caso, o algoritmo fica alternando entre os resultados de fase e tipo de FAI ao longo do tempo.

No entanto, em 96,4% dos casos o algoritmo classificou a fase de forma correta. A Figura 6.25 mostra um caso de FAI do Tipo RLC na fase “B” onde o resultado foi conclusivo. Pois o ângulo de terceiro harmônico se mostrou mais estável, o que torna clara a classificação de fase.

Embora a classificação de tipos de FAI e a classificação de fase serem abordadas dentro do mesmo algoritmo, como visto na subseção 4.4, a classificação do tipo de FAI obteve uma taxa de acerto levemente inferior a classificação de fase. Isso acontece porque houve casos onde o algoritmo Detector de Rompimento de Cabo não atuou, o que leva o algoritmo a classificar FAI do Tipo RLF e RLFC como sendo FAI do Tipo S. Porém, o fato de não haver sido detectado um rompimento de cabo, não atrapalha a classificação de fase, pois a classificação da fase é dependente apenas do módulo e ângulo de terceiro harmônico presente nas correntes de fase.

Embora o algoritmo utilize uma estrutura mais complexa e também a utilização de diversas variáveis para tomada de decisão, o uso da CPU foi de apenas 18% em uma amostragem de 128 amostras por ciclo com intervalo de execução de um ciclo. O algoritmo também é flexível quanto ao intervalo de execução.

Figura 6.25 – Amplitude em (a) e ângulo em (b) do terceiro harmônico medido nas correntes de fase. Em (c) tem-se a saída do classificador de fase e de tipo de FAI.



Fonte: Autoria própria.

6.4 DISCUSSAO DOS MODELOS DE FAI

Como visto na secção dos algoritmos, os modelos de FAI tiveram uma grande influência sobre o resultado de alguns métodos de detecção de FAI. A principal diferença entre os dois modelos está no espectro de harmônicos que é gerado ao aplicar a FAI. Este fator espectral fica evidente na Figura 6.9, onde no caso do modelo 2 os harmônicos ímpares não se destacam em relação aos pares. Esta característica foi observada para todos os solos testados, e é indiferente sobre o local da FAI ou sobre as características do alimentador.

Esta diferença espectral ocorre devido às curvas VxI dos dois modelos serem muito diferentes. O Modelo 2 utiliza variáveis que oscilam em uma faixa aleatória, produzindo assim, uma curva VxI também com característica aleatória. Essa aleatoriedade aparece nos componentes harmônicos e pode invalidar o teste de algoritmos que utilizam os componentes harmônicos para detecção de uma FAI.

Apesar do Modelo 2 utilizar uma variação aleatória de 10% sobre suas variáveis, observasse nas simulações que a amplitude dos harmônicos apresenta uma variação muito maior, chegando a superar 100% entre uma leitura e outra. A Tabela 6.8 mostra 7 leituras realizadas em sequência do terceiro harmônico quando realizado uma FAI com Modelo 2.

Tabela 6.8 – Sequência de leituras do terceiro harmônico para um FAI com o modelo 2.

Leitura	1	2	3	4	5	6	7
3° Harmônico (A)	3,33	2,79	1,53	2,65	2,57	1,76	3,11

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, a falta de aleatoriedade do Modelo 1 também pode afetar algoritmos que utilizam, por exemplo, filtros morfológicos ou outro tipo de análise no domínio do tempo. Apesar de o *buildup*, presente no Modelo 1, ser considerado uma variação no domínio do tempo, ele apenas produz uma diferença de amplitude entre todos os harmônicos, e não variações individuais como é o caso do Modelo 2. Esta característica de *buildup* não foi o suficiente para provocar atuações no algoritmo B, assim como foi indiferente nos resultados dos outros algoritmos.

Os diferentes solos utilizados no Modelo 1, apesar de apresentarem amplitudes distintas, mostraram pouca correlação para detecção de FAI quando comparado com os locais que foram realizado as FAI e também com os tipos de FAI, ou seja, os casos em que houve detecção em

um tipo de solo e não em outro tipo, foram poucos quando comparado à outros fatores que foram testados. Porém analisando os tipos de solo para o Modelo 2, percebe-se uma influência maior, principalmente nos algoritmos que utilizam a corrente de neutro. Isto porque, como visto na Figura 6.20, os diferentes tipos de solo apresentam uma porcentagem de terceiro harmônico muito distinta entre um solo e outro. Essa grande diferença percentual mostrou-se impactante para os algoritmo D e E, no entanto, esta característica condiz com o que foi apresentado por Liu et al. (2016) na Figura 2.4, onde o percentual de terceiro harmônico cai a medida que se aumenta a amplitude da corrente de FAI.

Já para o Modelo 1, esta distribuição da porcentagem de terceiro harmônico pela amplitude da corrente de FAI não ocorre da mesma forma. A Tabela 6.9 mostra a porcentagem de terceiro harmônico presente em cada tipo de solo do Modelo 1

Tabela 6.9 – Porcentagem de terceiro harmônico em diferentes solos do modelo 1.

Solos	Areia	Asfalto	Cascalho	Gramma	Paralelep.	Solo loc.
Amp.da fundam. (A)	7,25	3,22	21,5	51,38	15	42,4
3° Harmônico (%)	8.14	21,7	33,9	9,45	8,53	39,3

Fonte: Autoria própria.

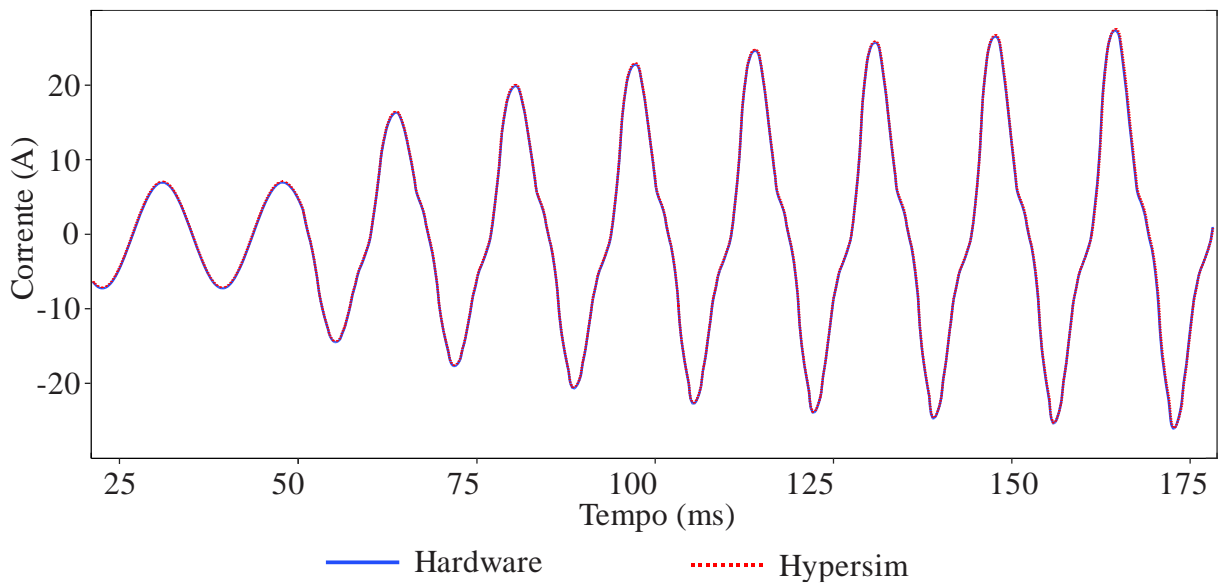
Nota-se que a distribuição da maior porcentagem de terceiro harmônico para a menor amplitude da FAI não ocorre no Modelo 1, o que não condiz com a Figura 2.4.

Em termos de aplicação em tempo real, os dois modelos se mostram simples e eficientes, consumindo muito pouco processamento do simulador. O tempo de CPU consumida do simulador pelos modelos não superou 1 us, ou seja, é praticamente insignificante nas simulações realizadas com um tempo de simulação de 130,20833 us.

6.5 AVALIACAO DO AMBIENTE DE TESTES EM HIL

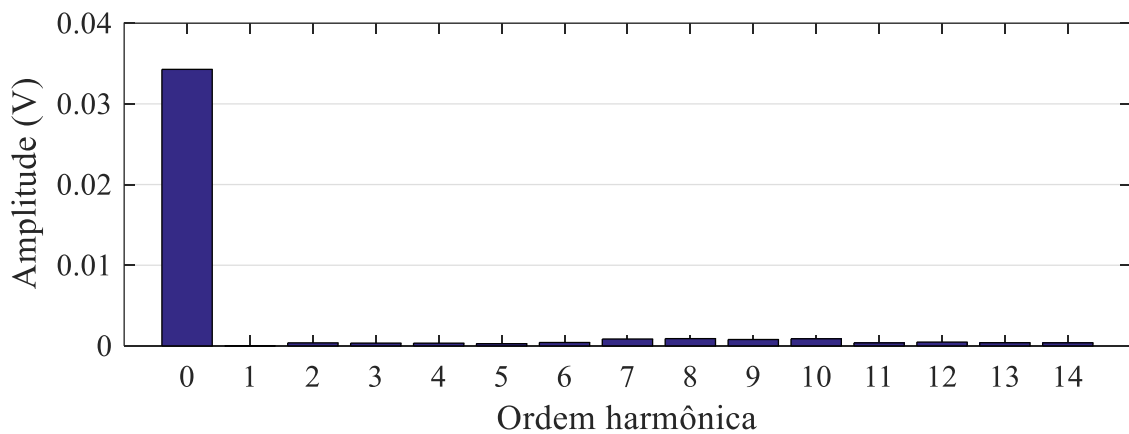
Para demonstrar o funcionamento correto do *hardware* desenvolvido, a Figura 6.26 mostra uma oscilografia de uma FAI obtida pelo *hardware*, e a mesma oscilografia capturada pelo Hypersim (software do RTS).

Figura 6.26 – Comparativo de uma oscilografia obtida pelo hardware e o sinal gerado pelo hypersim internamente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6.27 – Captura pelo hardware de um espectro harmônico sobre um sinal senoidal de 10V pipo a pico.



Fonte: Autoria própria.

Não se percebe diferença entre os dois sinais da Figura 6.26, ou seja, os dados que são obtidos pelo hardware correspondem exatamente aos dados simulados internamente. No entanto, de modo a avaliar de modo mais eficaz a aquisição de dados pelo hardware, a Figura 6.27 mostra um espectro harmônico obtido pelo hardware quando aplicado um sinal senoidal puro de 10V de pico a pico.

Analisando o espectro, percebe-se que praticamente não há distorções harmônicas inseridas pelo próprio hardware, ou seja, os conversores analógico/digital utilizados e toda a

estrutura da placa desenvolvida não influenciam nas medições realizadas.

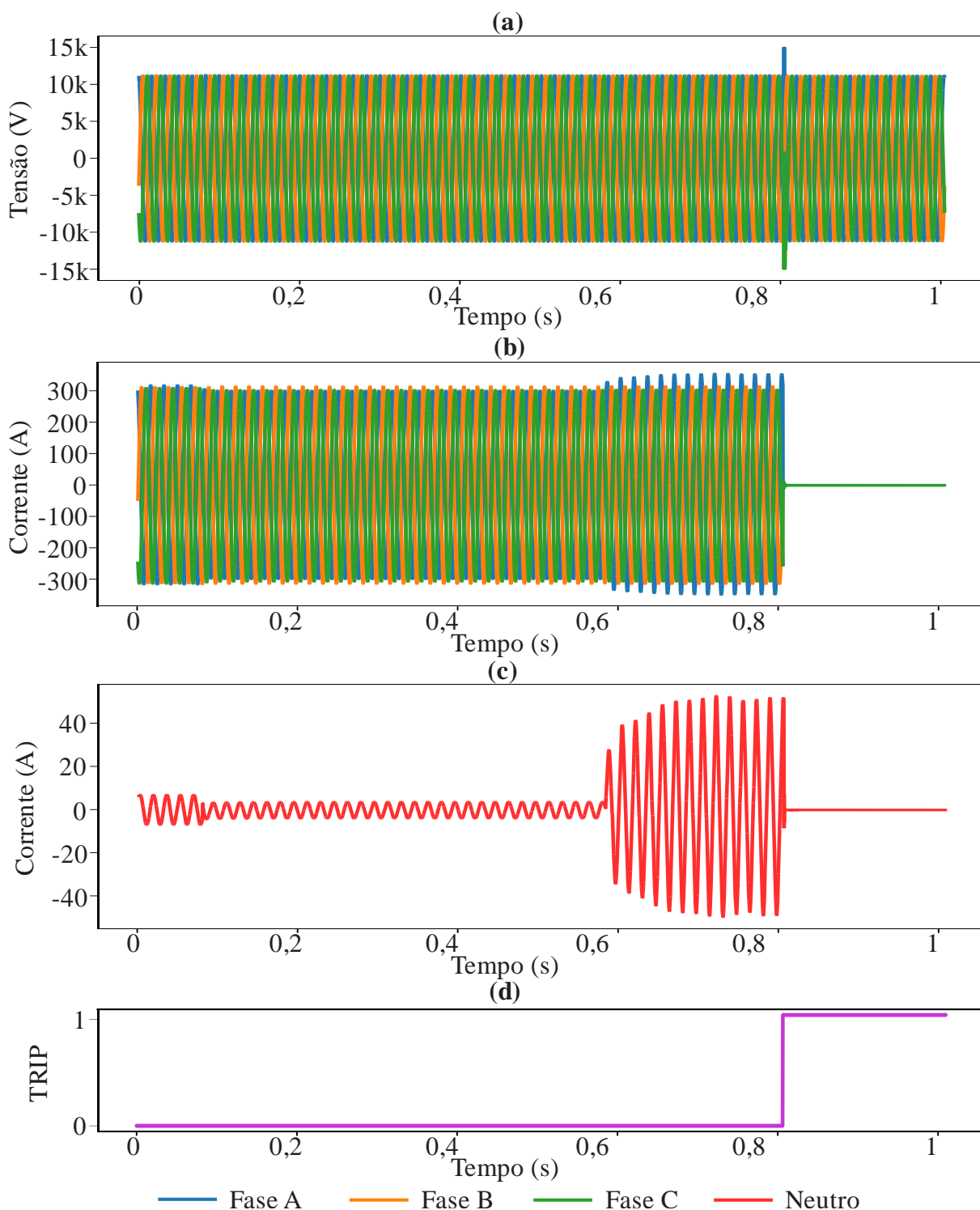
Também não se percebe um nível DC significativo. Apesar da Figura 6.27 mostrar uma amplitude de 35 mV no nível DC, este valor corresponde a 0,35% da componente fundamental (a qual não está mostrada na Figura 6.27 para melhores características visuais da figura), no entanto, a componente fundamental possui amplitude de 10V. O espectro harmônico foi obtido com amostragem de 128 amostras por ciclo.

Com o intuito de demonstrar o processo de HIL, a Figura 6.28 é apresentada. Onde, a tensão da subestação é mostrada em (a), a corrente nas três fases medida pelo hardware é mostrada em (b), a corrente de neutro medida na subestação é visualizada em (c), e a atuação do algoritmo é mostrada em (d).

O sinal de TRIP gerado pela detecção da FAI é então enviado ao RTS pela conexão em HIL, o qual faz a abertura das três fases na subestação, levando a corrente a zero.

Em relação a execução do sistema teste, o simulador necessitou de 80 us do tempo de simulação total utilizado. Porém este tempo não se mostrou constante em todas as simulações. Casos considerando *inrush* de transformador necessitaram de mais tempo para simulação. Além do mais, a utilização da saturação dos transformadores requer do simulador a execução de mais de uma interação por tempo de simulação. Isto faz com que o tempo necessário para execução do sistema possua valores maiores. Esse tempo chegou a valores de até 246 us para alguns casos. Desta forma, em simulações envolvendo *inrush* de transformador, utilizou-se um tempo de simulação de 260,416 us, o que corresponde a 64 amostras por ciclo de rede em 60 Hz. A Figura 6.29 mostra os tempos de simulação para os casos considerando *inrush* de transformador em (b), e para os demais casos em (a).


Figura 6.28 – Demonstrativo da simulação em HIL, onde em (a) tem-se a tensão na subestação, em (b) a corrente na subestação, em (c) a corrente de neutro na subestação, e em (d) o sinal de TRIP gerado ao se detectar uma FAI.




Fonte: Autoria própria.

Figura 6.29 – Tempos de simulação do RTS para os casos de FAI em (a) e também para os casos considerando *inrush* de transformador em (b).

(a)

Select	Id	Enabled	Exec	Exec Max	Remain	Remain Min	Comm	Comm Max	Sim	Sim Max	Acq/Par...	Last in Sync	Stretched St...
<input checked="" type="checkbox"/>	1		80.67	130.76	47.95	47.15	0.03	0.08	130.18	260.81	0.28	5514159	20

(b)

Select	Id	Enabled	Exec	Exec Max	Remain	Remain Min	Comm	Comm ...	Sim	Sim Max	Acq/Pa...	Last in ...	Stretc...
<input checked="" type="checkbox"/>	1		174.01	246.33	178.98	12.88	0.04	0.07	260.36	260.59	3.2	426824	0

Fonte: Autoria própria.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos algoritmos para detecção de FAI, sendo o algoritmo desenvolvido o que apresentou a melhor performance entre todos os testes realizados. Uma avaliação individual de cada método também foi realizada, onde foram avaliados os principais casos de FAI que não foram detectados pelos algoritmos. Também foi avaliado o processo de classificação de fase dos algoritmos, onde o método desenvolvido também apresentou o melhor desempenho.

O capítulo também discutiu acerca das características dos modelos de FAI utilizados, bem como, a suas influências sobre os algoritmos. Nesta análise percebeu-se uma influência grande do modelo de FAI nos resultados. As principais diferenças entre os dois modelos foram destacadas.

Por último, o capítulo apresenta algumas validações do *hardware* desenvolvido e também comenta sobre o tempo de simulação em diferentes casos apresentado pelo simulador da OPAL-RT.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 CONCLUSÕES

A avaliação dos métodos de detecção de FAI se deu pela análise da disponibilidade e também da segurança que o algoritmo apresentou. Dentre os cinco algoritmos testados, a metodologia de detecção de FAI desenvolvida neste trabalho apresentou o melhor resultado, possuindo o maior índice de disponibilidade e de segurança.

Os demais algoritmos testados obtiveram um bom desempenho, porém dois deles tiveram dificuldades em detectar FAI com modelos que não correspondiam com o qual foi validado.

As simulações dos quatro tipos de FAI apresentadas neste trabalho se mostraram reveladoras, pois os algoritmos obtiveram resultados distintos em diferentes tipos de FAI. Especialmente, nas FAI do Tipo RLC, os algoritmos testados apresentaram um desempenho não satisfatório. Já a metodologia desenvolvida neste trabalho se mostrou extremamente eficiente nestes casos.

Quanto ao quesito de classificação de fase, o algoritmo desenvolvido se destacou em relação aos demais métodos que foram testados. Isto porque os demais algoritmos tiveram extrema dificuldade em identificar a fase em falta nos casos de FAI do Tipo RLC. Vale destacar que a classificação da fase em defeito pode ser utilizada como informação para algoritmos de localização de FAI e também pode ser importante na realização de manobras e religamentos no alimentador.

Outra característica, presente apenas no algoritmo desenvolvido, é a classificação do tipo de FAI. A abordagem da classificação do tipo de FAI proposta se mostrou adequada, obtendo altas taxas de acerto. Este tipo de classificação também é importante devido a fornecer a característica do evento para algoritmos de localização de FAI e também para informar aos operadores possíveis grau de risco que aquela FAI está ocasionando, como por exemplo, saber se ocorreu um rompimento de cabo, onde o risco à população pode ser maior devido ao maior contato com a superfície.

Dois modelos de FAI foram implementados no RTS para realização de testes em tempo real. Os dois modelos de FAI utilizados nos testes se mostraram distintos na representatividade das características de FAI. Como consequência, alguns algoritmos obtiveram resultados

completamente diferentes nos dois modelos. A principal diferença entre os dois modelos é a aleatoriedade presente em um modelo e não no outro. Porém não coube a este trabalho identificar qual modelo melhor representa uma FAI, e sim comparar as diferenças entre os modelos, citando, os fatores que influenciam nos resultados.

Os testes em HIL com o OPAL-RT se mostrou eficiente e com um alto grau de confiabilidade nos resultados, conseguindo reproduzir em tempo real, com apenas um núcleo do processador, o sistema teste e também os Modelos de FAI. Para casos envolvendo *inrush* de transformador, houve a necessidade de se aumentar a tempo de simulação, porém, mesmo nestes casos, o simulador reproduziu os eventos de forma clara dentro de um tempo de simulação adequado.

Por fim, o hardware desenvolvido se mostrou extremamente prático e preciso para tais testes do tipo HIL. Podendo embarcar diversos métodos de detecção e classificação de FAI e realizar testes em malha fechada. Um dos pontos fracos do hardware desenvolvido foi a limitação de memória e processamento, porém, para a demanda deste trabalho, ele atendeu perfeitamente.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de um modelo de FAI mais realista, levando em consideração variações randômicas mais coerentes e também diferentes níveis de tensão.
- Testes de algoritmos em redes de distribuição reais, visando a validação dos métodos e também a análise perante a dados reais.
- Testes de algoritmos (computacionalmente) em sistemas mais desequilibrados e com diferentes configurações de ramais monofásicos.
- Testes de algoritmos para diversos tipos de cargas não lineares, e outras fontes harmônicas.

8 REFERÊNCIAS

- ABRADEE. **Campanha Nacional de Segurança com Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- BÉLANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J.-N. The what, where and why of real-time simulation. **Planet Rt**, v. 1, n. 1, p. 25–29, 2010.
- BENNER, C. L.; RUSSELL, B. D. Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 3, p. 635–640, 1997.
- EMANUEL, A. E. et al. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, p. 676–686, 1990.
- FARIAS, P. E. **Deteção e Classificação de Transitorios em Redes de Distribuição para Identificação de Falhas de Alta Impedância**. , 2013.
- GAUTAM, S.; BRAHMA, S. M. Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 2, p. 1226–1234, 2012.
- GHADERI, A.; GINN III, H. L.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. **Electric power systems research**, v. 143, p. 376–388, 2017.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power system relaying**. John Wiley & Sons, [s.l.] 2008. v. 22
- HOU, D. **Detection of high-impedance faults in power distribution systems**. 2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources. **Anais...** 2007
- KAVI, M.; MISHRA, Y.; VILATHGAMUWA, M. D. High-impedance fault detection and classification in power system distribution networks using morphological fault detector algorithm. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 12, n. 15, p. 3699–3710, 2018.
- LEÃO, A. P. et al. Características de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas de Distribuição em Galhos de Castanhola . 2020.
- LIMA, É. M. Proposição de um método de detecção de FAI baseado nos componentes

harmônicos de baixa frequência. 2016.

LIMA, É. M. et al. High impedance fault detection method based on the short-time Fourier transform. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 12, n. 11, p. 2577–2584, 2018.

LIU, J. et al. **Fault Location And Sevice Restoration For Electrical Distribution Systems**. [s.l: s.n.].

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

MUGOMBOZI, C. et al. **Emtp-matlab/sps co-simulation for large-scale integration of wind power plants**. Cigré Canada Conference Proceedings. CIGRÉ. **Anais...** 2012

NAKAGOMI, R. M. Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição. p. 90, 2006.

NAM, S. R. et al. **A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP**. 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262). **Anais...** 2001

OROZCO, R. H.; FLOREZ, J. J. M.; PATIÑO, J. F. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO POLINOMIAL DE LA CARGA UTILIZANDO ATP. **Scientia et technica**, v. 18, n. 1, p. 11–18, 2013.

PARISE, G.; GRASSELLI, U.; DI LUOZZO, V. Arcing fault in sub-distribution branch-circuits. **IEEE transactions on power delivery**, v. 8, n. 2, p. 580–583, 1993.

RUSSELL, B. D. IEEE Tutorial Course: Detection of Downed Conductors on Utility Distribution Systems. **IEEE Winter Power Meeting**, v. 5, p. 48, 1989.

RUSSELL, B. D.; CHINCHALI, R. P. A digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 1, p. 132–140, 1989.

SAMANTARAY, S. R.; DASH, P. K. High impedance fault detection in distribution feeders using extended kalman filter and support vector machine. **European transactions on electrical power**, v. 20, n. 3, p. 382–393, 2010.

SANTOS, W. C. et al. High impedance faults: From field tests to modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, n. 6, p. 885–896, 2013.

- SARLAK, M.; SHAHRTASH, S. M.; KHABURI, D. A. Design and implementation of a systematically tunable high impedance fault relay. **ISA transactions**, v. 49, n. 3, p. 358–368, 2010.
- SENGER, E. C.; PELLINI, E. L.; MANASSERO, G. J. Proposta de Proteção de Alta Sensibilidade para Detecção de Falta de Alta Impedância. **X Seminário Técnico de Proteção e Controle, Recife**, 2010.
- SHENG, Y.; ROVNYAK, S. M. Decision tree-based methodology for high impedance fault detection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 2, p. 533–536, 2004.
- STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. McGraw-Hill do Brasil, [s.l.] 1974.
- SUBRAMANIAN, S.; VENKATARAMAN, K. Detection of high impedance fault in MV distribution system. 2012.
- SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W.; FEDIRCHUK, D. J. Detection of high impedance arcing faults using a multi-layer perceptron. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 4, p. 1871–1877, 1992.
- TENGDIN, J. et al. High impedance fault detection technology. **Report of PSRC Working group D**, v. 15, p. 1996, 1996.
- TORRES, V. et al. Modeling and detection of high impedance faults. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 61, p. 163–172, 2014.
- WONTROBA, A. et al. **Comprehensive High Impedance Fault Model for Real-Time Environment**. IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. **Anais...** 2019a
- WONTROBA, A. et al. **Modeling and Real-Time Simulation of High Impedance Faults for Protection Relay Testing and Methods Validation**. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America). **Anais...** 2019b
- ZAMANAN, N.; SYKULSKI, J. K. Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in the electric arc. **WSEAS Transactions on power systems**, v. 1, n. 8, p. 1507–1512, 2006.