

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

Jean Pereira Rossini

**METODOLOGIA DE DETECÇÃO E SELEÇÃO DE FASES PARA
FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA RELAÇÃO
ANGULAR DE COMPONENTES SIMÉTRICAS**

Santa Maria, RS
2021

Jean Pereira Rossini

METODOLOGIA DE DETECÇÃO E SELEÇÃO DE FASES PARA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA RELAÇÃO ANGULAR DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

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

Orientador: Ghendy Cardoso Jr., Dr. Eng.
Coorientador: João Paulo Abreu Vieira, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2021

Rossini, Jean Pereira

METODOLOGIA DE DETECÇÃO E SELEÇÃO DE FASES PARA
FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA RELAÇÃO ANGULAR DE
COMPONENTES SIMÉTRICAS / Jean Pereira Rossini.- 2021.
122 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior

Coorientador: João Paulo Abreu Vieira

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2021

1. Faltas de alta impedância 2. Detecção de faltas 3.
Seleção de fases 4. Sistemas de distribuição 5.
Componentes simétricas I. Cardoso Junior, Ghendy II.
Abreu Vieira, João Paulo III. 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.

©2021

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

Endereço: Rua Herotildes Costa, 36, Bairro JK, Santa Maria, RS. CEP: 97035-370

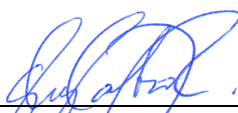
Fone (055)55 981048578; E-mail: j.perossini@gmail.com

Jean Pereira Rossini

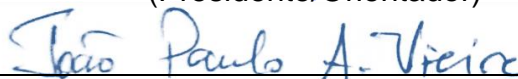
METODOLOGIA DE DETECÇÃO E SELEÇÃO DE FASES PARA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA RELAÇÃO ANGULAR DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

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

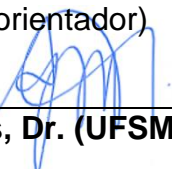
Aprovado em 28 de janeiro de 2021



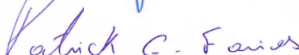
Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM) - Videoconferência
(Presidente/Orientador)



João Paulo Abreu Vieira, Dr. (UFPA) - Videoconferência
(Coorientador)



Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM) - Videoconferência



Patrick Escalante Farias, Dr. (IFRS) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

(Isaac Newton)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram, de alguma forma, durante o período de conclusão deste trabalho. De uma maneira especial, gostaria de agradecer:

- a meus pais, Clotildes e Irineu, pelo apoio incondicional desde o início de minha jornada acadêmica e por serem fonte de minha inspiração;

- a minha irmã, Janaina, por sempre acreditar em meu potencial;

- ao professor Ghendy Cardoso Jr. pela excelente orientação e pela confiança em mim depositada para a execução deste trabalho;

- ao professor João Paulo pela coorientação;

- aos professores Adriano de Peres Morais e Patrick Farias pelas excelentes contribuições e sugestões a este trabalho;

- aos colegas do Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES-CEESP) pela amizade e pelos conhecimentos compartilhados;

- à Universidade Federal de Santa Maria pelo ensino gratuito e de qualidade;

- ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo auxílio durante este trabalho;

- às instituições que prestaram apoio técnico-financeiro a este trabalho: INCT-GD, CNPq (processo 465640/2014-1), CAPES (processo no. 23038.000776/2017-54), FAPERGS (17/2551-0000517-1), Grupo Equatorial Energia e Universidade Federal do Pará. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001;

- aos amigos Bruno Trindade, Giancarlo Daros, Lucas Rocha, Lucas Jantsch, Thiago Almeida, Willian Padilha, Rafael Boufleuer, Marion Gallas, Aldair Wontroba, Guilherme Braga, Ruy Ferri, Kaynan Maresch, Aquiles Borin, Eduardo Giuliani, Miguel Martins, Victor Refosco, Kevin Morais, Marcel Dall Pai, Daniel Winck, Diogo Zancan, Rudieri Copetti, Guilherme Monteiro, Renan Barcelos, Rossano Barcelos, Jéssica Puerari, Fernanda Jardim, Cândida Pereira, Liana Margutti, Flávio Reck, Augusto Bertoletti, Gabriela Ramos e Thaiara Oliveira pelo companheirismo durante esta jornada;

- aos demais não citados aqui nominalmente, mas que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

RESUMO

METODOLOGIA DE DETECÇÃO E SELEÇÃO DE FASES PARA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA RELAÇÃO ANGULAR DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

AUTOR: Jean Pereira Rossini
ORIENTADOR: Ghendy Cardoso Junior
COORIENTADOR: João Paulo Abreu Vieira

Este trabalho propõe um novo método de detecção e outro para seleção de fases quanto à ocorrência de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica. Ambos os métodos são fundamentados em uma metodologia de seleção de fases originalmente desenvolvida para as linhas de transmissão, que foi adaptada para utilização em faltas de alta impedância. Os métodos de detecção e seleção desenvolvidos empregam dois tipos de coeficientes, calculados a partir das componentes simétricas de sinais de corrente medidos na subestação. O primeiro coeficiente refere-se à diferença angular entre as componentes de sequência negativa e positiva, enquanto o segundo calcula a diferença angular entre as sequências negativa e zero. A partir do monitoramento desses coeficientes, calculados para a frequência fundamental e a terceira harmônica, é possível detectar a falta, bem como indicar a fase em que ocorreu o defeito. O desempenho dos métodos propostos foi avaliado a partir de simulações realizadas em um sistema teste baseado em um alimentador real de distribuição. Os resultados foram apresentados considerando quatro diferentes tipos de configuração de falta de alta impedância, aspecto que é raramente abordado neste ramo de pesquisa. Os métodos também foram avaliados para desequilíbrio de carga, diferentes tipos de superfície de alta impedância, diferentes distâncias entre a falta e a subestação e transitórios provocados por chaveamento de bancos de capacitores. Os resultados obtidos demonstraram a boa performance dos métodos propostos, os quais destacam-se, principalmente, por não sofrerem influências significativas do desequilíbrio de carga, fator comumente presente em alimentadores de distribuição.

Palavras-chave: Faltas de Alta Impedância. Detecção de Faltas. Seleção de Fases. Sistemas de Distribuição. Componentes Simétricas.

ABSTRACT

DETECTION AND PHASE SELECTION METHODOLOGY FOR HIGH IMPEDANCE FAULTS USING ANGULAR RELATION OF SYMMETRICAL COMPONENTS

AUTHOR: JEAN PEREIRA ROSSINI
ADVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR
CO-ADVISOR: JOÃO PAULO ABREU VIEIRA

This paper proposes new detection and phase selection methods for high impedance faults in distribution networks. Both methods are based on a phase selection methodology developed for transmission lines, which was adapted for high impedance faults. The detection and phase selection methods use two different coefficients obtained from symmetrical components of current signals measured at the substation. The first coefficient is calculated by the angular difference between the negative and positive sequence, while the second is obtained by the angular difference between the negative and zero sequence. By monitoring these coefficients calculated for fundamental frequency and third harmonic, it is possible to detect the fault and also determine the faulted phase. The performance of the proposed methods was evaluated by simulations on a test system based on a real distribution feeder. The results were presented considering four different high impedance fault configurations, an aspect rarely addressed in this branch of knowledge. The methods were also evaluated for load unbalance, several high impedance surfaces, different distances between fault and substation, and transients from capacitor switching events. The results showed a good performance of the proposed methods highlighted for not suffering considerable load unbalance influence, a common feature of distribution feeders.

Keywords: High Impedance Faults. Fault Detection. Phase Selection. Distribution Systems. Symmetrical Components.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Formas de Onda no Ponto da FAI: (a) tensão; (b) corrente	35
Figura 2.2 – Curvas $V \times I$ Correspondentes a um Ciclo de FAI em cada Tipo de Superfície: (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) solo local...	37
Figura 2.3 – Análise da Corrente de Falta em uma FAI: (a) conteúdo harmônico; (b) ângulo da terceira harmônica; (c) períodos de condução e não condução	39
Figura 2.4 – Diferentes Comportamentos da Corrente de Falta: (a) crescimento gradual; (b) crescimento rápido	40
Figura 2.5 – FAI na Configuração FD	41
Figura 2.6 – FAI na Configuração FDS-F	42
Figura 2.7 – FAI na Configuração FDS-C	44
Figura 2.8 – FAI na Configuração FDS-FC	45
Figura 4.1 – Comportamento dos Coeficientes M_1 e M_2	63
Figura 4.2 – Sinos de Seleção de Fase	65
Figura 4.3 – Sinos de Seleção de Fases para FAI nas Configurações FD e FDS-F ..	68
Figura 4.4 – Comportamento Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para $\Delta \vec{I}_b = 1 \angle 30^\circ$ e $ \Delta \vec{I}_a = \Delta \vec{I}_c $: (a) $ \Delta \vec{I}_a = \Delta \vec{I}_c = 0,1$; (b) $ \Delta \vec{I}_a = \Delta \vec{I}_c = 0,3$; (c) $ \Delta \vec{I}_a = \Delta \vec{I}_c = 0,5$	70
Figura 4.5 – Comportamento Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para $\Delta \vec{I}_b = 1 \angle 30^\circ$ e $ \Delta \vec{I}_a \neq \Delta \vec{I}_c $: (a) $ \Delta \vec{I}_a = 0,3$ e $ \Delta \vec{I}_c = 0,1$; (b) $ \Delta \vec{I}_a = 0,5$ e $ \Delta \vec{I}_c = 0,1$	71
Figura 4.6 – Sinos de Seleção de Fases para FAI na Configuração FDS-C	73
Figura 4.7 – Comportamento Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para $\Delta \vec{I}_b = 0,1 \angle 30^\circ$, $ \Delta \vec{I}_a \gg \Delta \vec{I}_b $ e $ \Delta \vec{I}_c \gg \Delta \vec{I}_b $: (a) $ \Delta \vec{I}_a = \Delta \vec{I}_c = 1$; (b) $ \Delta \vec{I}_a = 1$ e $ \Delta \vec{I}_c = 0,9$; (c) $ \Delta \vec{I}_a = 1$ e $ \Delta \vec{I}_c = 0,8$	74
Figura 4.8 – Esquema Proposto para a Seleção de Fases em FAI	76
Figura 4.9 – Fluxograma do Algoritmo Detector de FAI	79
Figura 4.10 – Fluxograma do Algoritmo de Seleção de Fases para FAI	83
Figura 5.1 – Modelo para a Simulação de FAI	86
Figura 5.2 – Comportamento da Resistência R_2 : (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) solo local	88
Figura 5.3 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste	90
Figura 5.4 – Caso Detalhado para Detecção de uma FAI na Fase B	93
Figura 5.5 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI – Configuração FD	95
Figura 5.6 – Análise do Critério de th_{seq} : (a) solo asfalto; (b) solo areia	96
Figura 5.7 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI – Configuração FDS-F ..	98
Figura 5.8 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI - Configuração FDS-FC ..	98
Figura 5.9 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI – Configuração FDS-C ..	99
Figura 5.10 – Análise Geral da Ação do Desequilíbrio de Carga em Relação ao Detector de FAI	100
Figura 5.11 – Análise da Influência da Distância do Ponto da FAI no Detector de FAI	101
Figura 5.12 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI através da Variação de th_{seq} : (a) por configuração de FAI ($d = 0\%$); (b) por nível de desequilíbrio	103
Figura 5.13 – Caso Detalhado para Seleção de Fases	104
Figura 5.14 – Comparação entre os Resultados Obtidos Para o Detector de FAI e Seleccionador de Fases	106

Figura 5.15 – Análise da Influência da Distância do Ponto da FAI no Seleccionador de Fases	107
Figura 5.16 – Porcentagem de Acertos do Seleccionador Considerando Variação do Instante Pré-falta e th_{seq} ($d = 0\%$)	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Níveis de Corrente de Falta em uma FAI	34
Tabela 4.1 – Valores dos Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para FAI na Configuração FD ou FDS-F	68
Tabela 4.2 – Valores dos Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para FAI na Configuração FDS-C73	68
Tabela 5.1 – Características do Desequilíbrio de Carga Simulado	91
Tabela 5.2 – Características dos Pontos de Simulação de FAI.....	91
Tabela 5.3 – Detalhes dos Casos Simulados para FAI	92
Tabela 5.4 – Detalhes dos Casos Simulados para Chaveamento de Banco de Capacitores	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Características Extras dos Métodos de Detecção de FAI	58
Quadro 4.1 – Respostas das Variáveis $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$	78
Quadro A. 1 – Características das Conexões entre os Nós do Sistema	117
Quadro A. 2 – Parâmetros dos Condutores	119
Quadro A. 3 – Parâmetros do Transformador da Subestação	120
Quadro A. 4 – Parâmetros dos Transformadores Trifásicos Distribuídos ao Longo do Alimentador	120
Quadro A. 5 – Cargas Conectadas ao Secundário dos Transformadores Trifásicos para $d = 0\%$	120
Quadro A. 6 – Cargas Conectadas ao Secundário dos Transformadores Trifásicos para $d = 20\%$	121
Quadro A. 7 – Cargas Conectadas ao Secundário dos Transformadores Trifásicos para $d = 40\%$	121
Quadro A. 8 – Parâmetros dos Transformadores Monofásicos	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFIS	<i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CODO	<i>Closing Opening Difference Operation</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
FAI	Falta de alta impedância
FD	Falta em derivação
FDS-F	Falta em derivação-série com contato de alta impedância do lado da fonte
FDS-C	Falta em derivação-série com contato de alta impedância do lado da carga
FDS-FC	Falta em derivação-série com contato de alta impedância do lado da fonte e da carga
FFCC	Filtro de Fourier de Ciclo Completo
RNA	Rede Neural Artificial
STFT	<i>Short-time Fourier Transform</i>
TDF	Transformada de Fourier Discreta
VMD	<i>Variational Mode Decomposition</i>
TC	Transformador de Corrente
TW	Transformada de Wavelet

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Operador rotacional
β_{max}	Ângulo máximo de variação de cada sino de seleção de fases
$cont$	Contador (<i>timer</i>) dos algoritmos propostos
d	Desequilíbrio de carga
$\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c$	Fasores de corrente em componentes de fase para as fases <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> , respectivamente
$\vec{I}_a^m, \vec{I}_b^m, \vec{I}_c^m$	Fasores de corrente em componentes de fase para harmônica <i>m</i>
$\Delta\vec{I}_a^m, \Delta\vec{I}_b^m, \Delta\vec{I}_c^m$	Fasores incrementais de corrente em componentes de fase para harmônica <i>m</i>
$\vec{I}_0, \vec{I}_1, \vec{I}_2$	Fasores de corrente em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente
$\vec{I}_{a0}, \vec{I}_{a1}, \vec{I}_{a2}$	Fasores de corrente em componentes simétricas obtidos em relação à fase <i>A</i>
$\vec{I}_0^m, \vec{I}_1^m, \vec{I}_2^m$	Fasores de corrente em componentes simétricas para harmônica <i>m</i>
$\Delta\vec{I}_0^m, \Delta\vec{I}_1^m, \Delta\vec{I}_2^m$	Fasores incrementais de corrente em componentes simétricas para harmônica <i>m</i>
I_{base}	Corrente base
$I_{média}$	Média aritmética entre as correntes na fase <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i>
M_1	Coefficiente de seleção calculado a partir da diferença angular entre os fasores das componentes simétricas de sequência negativa e positiva, sem a remoção de valores pré-falta
M_2	Coefficiente de seleção de fases calculado a partir da diferença angular entre os fasores das componentes simétricas de sequência negativa e zero, sem a remoção de valores pré-falta
$M_{1\Delta}^m$	Coefficiente de seleção de fases calculado a partir da diferença angular entre os fasores das componentes simétricas de sequência negativa e positiva, com a remoção de valores pré-falta, para a harmônica <i>m</i>

$M_{2\Delta}^m$	Coeficiente de seleção de fases calculado a partir da diferença angular entre os fasores das componentes simétricas de sequência negativa e zero, com a remoção de valores pré-falta, para a harmônica m
$n_{detecção}$	Amostra de detecção da falta
n_{falta}	Amostra relativa ao período de falta
$n_{pré-falta}$	Amostra relativa ao período de pré-falta
n_{ref}	Amostra de referência para o cálculo dos fasores incrementais
R_1, R_2	Resistências para modelagem da falta de alta impedância
t_{falta}	Instante de tempo do período de falta referente à amostra n_{falta}
$t_{pré-falta}$	Instante de tempo do período pré-falta referente à amostra $n_{pré-falta}$
$tipo_m$	Resposta do algoritmo selecionador ou detector em relação a harmônica m
th_{seq}	Valor de referência para o módulo dos fasores incrementais das componentes simétricas
th_k	Valor de referência para a variável $cont$, em que k refere-se ao número de ciclos utilizado como referência
V_c, I_c	Tensão e corrente das curvas V x I, respectivamente
V_f, I_f	Tensão e corrente no ponto de falta, respectivamente
Z_f	Impedância de falta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	27
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	28
1.3	MOTIVAÇÃO	28
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	30
1.5	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	30
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	33
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	33
2.2	CARACTERÍSTICAS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	33
2.3	CONFIGURAÇÕES DE FAI	40
2.3.1	Falta em Derivação (FD)	40
2.3.2	Falta em Derivação-série com Contato de Alta Impedância do Lado da Fonte (FDS-F)	41
2.3.3	Falta em Derivação-série com Contato de Alta Impedância do Lado da Carga (FDS-C)	43
2.3.4	Falta em Derivação-série com Contato de Alta Impedância do Lado da Fonte e da Carga (FDS-FC)	44
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
3	ESTADO DA ARTE DA DETECÇÃO E SELEÇÃO DE FASES PARA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	47
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	47
3.2	METODOLOGIAS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ..	47
3.2.1	Técnicas no Domínio do Tempo	48
3.2.2	Técnicas no Domínio da Frequência	50
3.2.3	Técnicas no Domínio Tempo-frequência	53
3.2.4	Técnicas no Domínio Tempo-escala	54
3.2.5	Técnicas Híbridas	56
3.3	ANÁLISE DA SELEÇÃO DE FASES E TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE FAI UTILIZADAS EM ALGORITMOS DETECTORES	57
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
4	METODOLOGIA DE RELAÇÃO ANGULAR DE COMPONENTES SIMÉTRICAS	61
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	61
4.2	MÉTODO DE KASZTENNY, CAMPBELL E MAZEREEUW (2000).....	61
4.3	ABORDAGEM ANALÍTICA DO MÉTODO DE KASZTENNY, CAMPBELL E MAZEREEUW (2000) EM FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	66
4.3.1	Faltas de Alta Impedância na Configuração FD e FDS-F	67
4.3.2	Faltas de Alta Impedância na Configuração FDS-FC	69
4.3.3	Faltas de Alta Impedância na Configuração FDS-C	72
4.4	MÉTODOS PROPOSTOS	75
4.4.1	Conceito Geral	75
4.4.2	Algoritmo de Detecção de FAI	78
4.4.3	Algoritmo de Seleção de Fases para FAI	82
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	85

5.2	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO	85
5.2.1	Modelagem da Falta de Alta Impedância	85
5.2.2	Modelagem do Sistema Teste	89
5.3	RESULTADOS DO ALGORITMO DETECTOR DE FAI	92
5.3.1	Caso Detalhado	92
5.3.2	Influência da Configuração de FAI e Tipos de Solo	94
5.3.3	Influência do Desequilíbrio de Carga	99
5.3.4	Influência da Distância da FAI em Relação à Subestação.....	101
5.3.5	Influência da Variação de th_{seq}.....	102
5.4	RESULTADOS DO ALGORITMO DE SELEÇÃO DE FASES PARA FAI ..	103
5.4.1	Caso Detalhado	103
5.4.2	Comparação de Desempenho entre os Algoritmos de Detecção e de Seleção de Fases	105
5.4.3	Influência da Distância da FAI em Relação à Subestação.....	107
5.4.4	Influência da Variação do Instante de Pré-falta e th_{seq}	108
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – PARÂMETROS DO SISTEMA TESTE	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O sistema de distribuição de energia elétrica refere-se à porção terminal do sistema elétrico de potência em que a energia elétrica é entregue aos seus consumidores finais. Geralmente esse tipo de sistema possui configuração aérea e, em sua maior parte, utiliza condutores nus (não isolados), dispostos em postes de concreto. Seus alimentadores possuem grande extensão e cobrem desde os centros urbanos até o perímetro rural, com características como a presença de derivações (trifásicas, bifásicas e monofásicas) e troca de tipos de condutores ao longo da rede. Além disso, é comum, em sistemas de distribuição, a presença de cargas desequilibradas, fato que, juntamente com a presença de derivações monofásicas e bifásicas, faz com que este tipo de sistema possua um maior grau de desequilíbrio de carga (ou desequilíbrio de corrente) quando comparado a sistemas de transmissão.

As redes de distribuição de energia elétrica possuem seus condutores mais próximos ao solo em comparação com as linhas de transmissão. Esse fator, aliado ao uso de disposição aérea de condutores nus, faz com que as redes de distribuição estejam mais propensas à ocorrência de faltas ao longo de seus alimentadores. As faltas podem ser ocasionadas por diversos agentes, que incluem desde o simples contato de uma árvore com a rede até a queda de condutores sobre o solo devido a efeitos climáticos, como a ação do vento.

Dentre os tipos de falta que podem incidir em sistemas de distribuição, está a falta de alta impedância (FAI). Esse fenômeno ocorre quando um condutor da rede primária entra em contato com uma superfície de alta impedância, como asfalto, galhos de árvores, grama, entre outros. Conseqüentemente, tem-se uma corrente de falta reduzida, cuja amplitude é muito pequena quando comparada à corrente de carga do alimentador. Dessa forma, geralmente as faltas de alta impedância não sensibilizam as tradicionais proteções de sobrecorrente presentes nos alimentadores (AUCOIN, 1985).

Assim, surge a necessidade de se desenvolverem métodos específicos para a detecção de faltas de alta impedância, sendo os primeiros estudos relevantes no assunto datados nos anos 70 e 80. Desde então, foram desenvolvidos diversos algoritmos, cada um deles com suas especificidades, analisando diferentes

características da falta de alta impedância, seja no domínio do tempo, seja no domínio da frequência (ou, ainda, em ambos os domínios). Contudo, apesar dos diversos trabalhos existentes, ainda não há uma solução definitiva para esse problema, e novos métodos e abordagens são sempre bem-vindos no intuito de preencher as lacunas ainda existentes neste ramo de pesquisa.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver algoritmos para detecção e seleção de fases para faltas de alta impedância a partir da relação angular entre as componentes simétricas.

Como objetivos específicos, este trabalho visa:

- Adaptar o método de seleção já consolidado de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) para a aplicação em faltas de alta impedância;
- Desenvolver um algoritmo de detecção de FAI que também seja capaz de indicar a fase em que ocorreu o defeito;
- Desenvolver um selecionador de fases que seja aplicável a métodos de detecção que não contenham essa função;
- Abordar os efeitos de diferentes configurações de FAI e desequilíbrios de carga perante o desempenho dos métodos, fatores que ainda carecem de soluções na literatura especializada;
- Validar o algoritmo de detecção diante de chaveamentos de bancos de capacitores, de forma a verificar possíveis operações falso-positivas.

1.3 MOTIVAÇÃO

As faltas de alta impedância, por não sensibilizarem as proteções de sobrecorrente existentes no alimentador, podem permanecer ativas no sistema por horas ou até mesmo dias, representando um grande risco de choque elétrico a qualquer ser vivo próximo ao local do defeito. Além disso, tais faltas são geralmente acompanhadas por arco elétrico, o que pode dar origem a incêndios e queimadas. Um exemplo disso foi o evento conhecido como *Black Saturday*, em que prováveis faltas de alta impedância foram apontadas como uma das causas iniciais de uma série de

queimadas que resultaram em um total de 173 mortos em 2009, na Austrália (2009 VICTORIAN BUSHFIRES ROYAL COMMISSION, 2010).

Além do fator segurança, as faltas de alta impedância podem ser originadas no rompimento de um condutor que entra em contato com uma superfície de alta impedância, provocando a interrupção no fornecimento de energia elétrica à porção do sistema a jusante do ponto de falta. Esse fato impacta diretamente os indicadores de qualidade da concessionária, que medem a frequência e a duração que tais interrupções ocorrem no sistema. Todo ano, são milhões de reais pagos em multas pelas concessionárias relativos à violação dos limites máximos permitidos para cada indicador de qualidade.

Dessa forma, seja no âmbito da segurança, seja no âmbito de indicadores de qualidade, há a necessidade de defeitos como faltas de alta impedância serem sanados o mais rápido possível. Porém o que ocorre atualmente, na maioria das concessionárias, é um processo de identificação da FAI que se dá de forma lenta, pois ainda é dependente de reclamações realizadas pelos consumidores afetados pelo defeito. Nesse contexto, surgem as metodologias de detecção de FAI, que visam indicar a presença desse tipo de defeito automaticamente, uma vez que nenhum dos equipamentos tradicionais de proteção instalados na rede possui essa capacidade. O uso de um detector pode ser, ainda, acompanhado de um selecionador de fases, que permite indicar quais das fases do sistema estão envolvidas na falta.

Os usos tanto do detector quanto do selecionador são etapas que precedem a localização da FAI e fornecem informações importantes para a indicação do local do defeito. O detector é o responsável por indicar o instante de início da falta a partir do qual o localizador passa a ser executado, ou seja, detectores são utilizados para a inicialização de metodologias de localização. O selecionador, por sua vez, faz-se necessário, pois muitos dos localizadores de FAI existentes são desenvolvidos para atuar apenas na fase sob falta. Além disso, selecionadores de fases podem ser utilizados na solução de problemas de múltiplas estimativas¹ ligados à localização de faltas. Pontos do alimentador que não apresentarem a fase indicada pelo selecionador em sua configuração podem ser excluídos dos possíveis locais de falta, reduzindo assim o número de soluções a serem analisadas. Dessa forma, a utilização de

¹ Refere-se a um tipo de problema comum a localizadores de falta (principalmente aqueles baseados no cálculo de impedância aparente), em que mais de um ponto do alimentador é indicado como local da falta.

metodologias de detecção e seleção de fases em conjunto com localizadores mostra-se muito importante, de modo que faltas de alta impedância sejam solucionadas mais rapidamente para o restabelecimento das condições normais de operação do sistema de distribuição de energia elétrica.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A principal contribuição deste trabalho está no desenvolvimento de um detector e selecionador de fases para faltas de alta impedância considerando quatro tipos diferentes de configurações de falta. Os estudos apresentados na literatura especializada geralmente abordam métodos desenvolvidos e validados em apenas uma (em alguns casos, duas) das configurações de FAI possíveis. Além disso, os métodos propostos também possuem bom desempenho perante redes de distribuição com forte grau de desequilíbrio de carga. Grande parte dos algoritmos existentes não considera esse fator, sendo validados apenas em sistemas equilibrados.

1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

As delimitações deste trabalho são:

- Desenvolvimento de metodologias de detecção e seleção de fases para faltas de alta impedância monofásicas com presença de arco elétrico;
- Desenvolvimento de algoritmos que utilizem sinais instantâneos de corrente medidos a partir da subestação;
- Validação dos algoritmos propostos com faltas de alta impedância simuladas no *software* ATPDraw através do modelo de resistores em série inicialmente proposto por Nam et al. (2001).

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo, que possui carácter introdutório, o restante deste trabalho é estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: caracterização do fenômeno de faltas de alta impedância;

- Capítulo 3: apresentação do estado da arte da detecção de faltas e seleção de fases em uma abordagem relacionada a faltas de alta impedância;
- Capítulo 4: abordagem da seleção de fases através da relação angular de componentes simétricas e apresentação dos algoritmos propostos;
- Capítulo 5: avaliação dos resultados obtidos pelos algoritmos propostos considerando fatores como diferentes tipos de superfícies de alta impedância e variação do desequilíbrio de carga do alimentador;
- Capítulo 6: conclusões em relação ao desempenho dos algoritmos propostos e sugestões de trabalhos futuros.

2 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo trata de assuntos introdutórios ao conceito de faltas de alta impedância. Primeiramente, serão abordadas as principais características desse tipo de defeito no que diz respeito às dinâmicas entre o condutor energizado e a superfície de alta impedância, apresentando-se, especificamente, os efeitos que a interação condutor-superfície possui em relação aos sinais de corrente e tensão no ponto da falta. Posteriormente, serão abordados os tipos de configurações em que uma falta de impedância pode ocorrer, de forma a averiguar o efeito que essas configurações causam nas medições de corrente realizadas a partir da subestação de um alimentador de distribuição.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Faltas de alta impedância são distúrbios produtores de uma corrente de falta de pequena amplitude que não pode ser detectada ou interrompida pela proteção convencional de sobrecorrente (AUCOIN, 1985). Tal tipo de falta geralmente ocorre quando um condutor energizado da rede primária de distribuição entra em contato, direta ou indiretamente, com superfícies de alta impedância, como asfalto, árvores, areia, grama, etc. Uma FAI pode ser provocada por diversos fatores, que vão desde o rompimento de um condutor que cai sobre o solo (contato direto) até a presença de correntes de fuga nos isoladores que sustentam a rede (FANUCCHI, 2014), criando um caminho entre condutor e solo através da estrutura do poste (contato indireto).

A amplitude da corrente de falta de uma FAI está diretamente relacionada com a superfície de contato. Russell (1989) realizou um estudo prático com FAI a partir de um condutor rompido submetido ao contato com diferentes superfícies de alta impedância. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.1, na qual se pode notar que a amplitude da corrente é maior quando a superfície encontra-se molhada, mostrando direta relação entre a amplitude da corrente e a umidade presente na superfície. Um estudo semelhante também foi realizado por Santos (2011), e os resultados alcançados, conforme Tabela 2.1, foram semelhantes aos resultados de Russell (1989) em relação ao estado da superfície (molhado ou seco). A partir dos

resultados dos dois estudos, é possível notar que a corrente máxima alcançada em uma FAI não ultrapassou os 90A, valor que é considerado baixo quando comparado com a corrente de carga de um alimentador e que pode ser facilmente confundido com outros transitórios da rede de distribuição, como, por exemplo, correntes oriundas de chaveamento de banco de capacitores, entradas e saídas de carga e energização de transformadores.

Tabela 2.1 – Níveis de Corrente de Falta em uma FAI

Referência	Nível de Tensão do Experimento	Superfície	Corrente de Falta (A)	
			Superfície Seca	Superfície Molhada
Russel (1989)	12,5 kV	Asfalto	0	-
		Concreto	0	-
		Concreto armado	75	-
		Areia	0	15
		Gramma	25	50
Santos (2011)	13,8 kV	Areia	< 10	< 50
		Asfalto	0	< 20
		Brita	0	< 50
		Calçamento	< 10	< 20
		Gramma	< 60	< 90
		Solo Local ²	0	< 60

Fonte: Adaptado de Russel (1989) e Santos (2011).

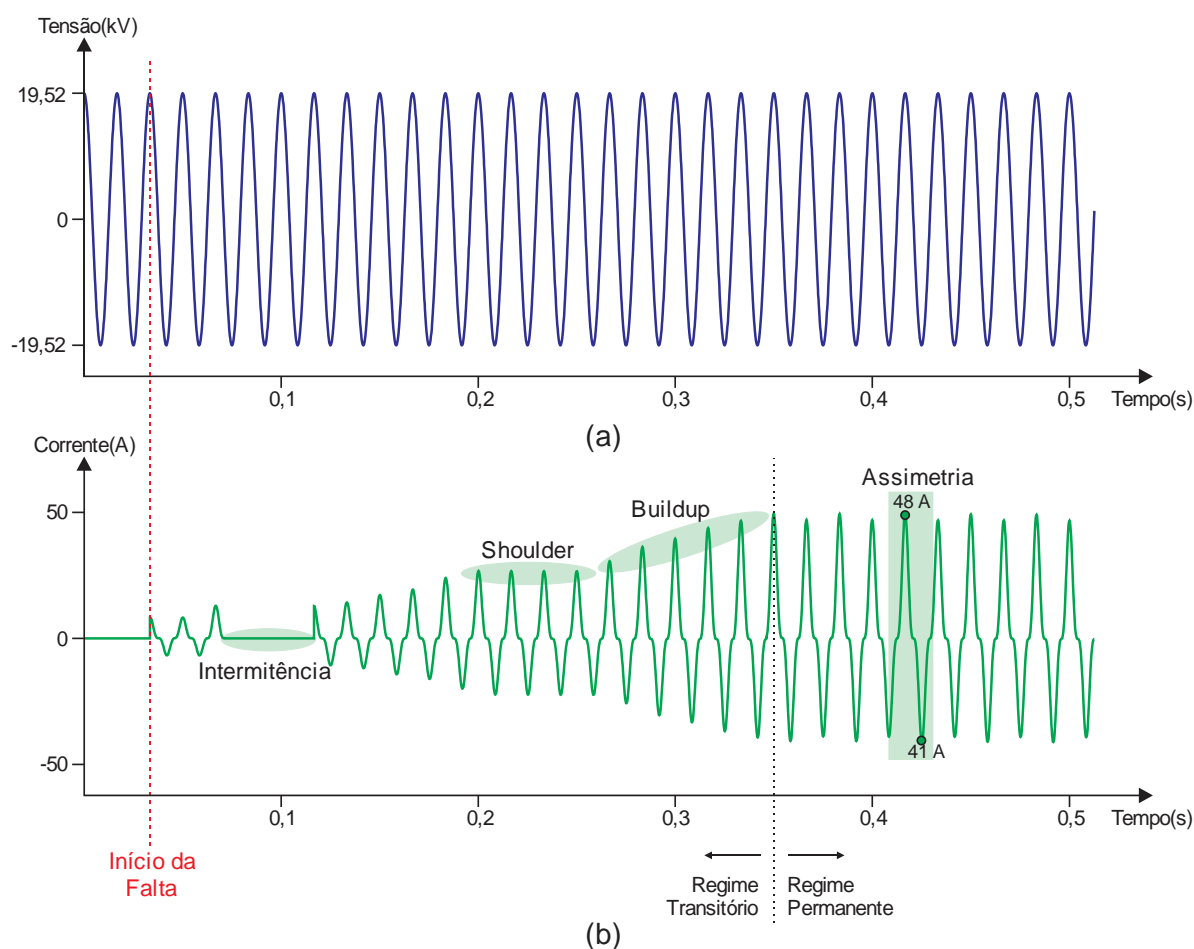
A interação entre o condutor energizado e a superfície de alta impedância origina outra característica muito comum na FAI, que é a presença de arco elétrico. Segundo Nakagomi (2006), a partir da diferença de potencial entre condutor e superfície, estabelece-se um campo elétrico que é responsável por acelerar os elétrons livres presentes no ar. Esses elétrons, quando atingem determinada energia cinética, ionizam moléculas neutras do ar e liberam novos elétrons livres, que são novamente acelerados e recomeçam o ciclo. A repetição desse fenômeno em um pequeno intervalo de tempo é conhecida como avalanche e é responsável pelo

² Solo do local em que foi realizado o experimento.

rompimento do dielétrico do ar e pela passagem de corrente entre condutor e superfície, estabelecendo, então, o arco elétrico.

A presença do arco elétrico, bem como sua interação com a superfície de alta impedância, propicia outras características específicas da corrente de falta de uma FAI, como *buildup*, *shoulder*, intermitência, assimetria, não linearidade e aleatoriedade. A tensão no ponto de falta, por sua vez, não sofre grandes alterações, preservando sua característica senoidal e podendo apresentar variações não significativas em sua amplitude, variações estas muito menores que aquelas provocadas por faltas de baixa impedância (SANTOS, 2016). Sinais típicos da corrente e tensão no ponto da FAI oriundos de uma simulação são apresentados na Figura 2.1, em que algumas das características específicas da corrente de falta são enfatizadas.

Figura 2.1 – Formas de Onda no Ponto da FAI: (a) tensão; (b) corrente



Fonte: O autor.

A Figura 2.1 também apresenta a divisão do sinal da corrente de falta em dois períodos: o regime transitório e o regime permanente (NAM et al., 2001). O regime transitório refere-se, geralmente, ao período inicial da falta, em que variações na amplitude da corrente manifestam-se com maior frequência. Já o regime permanente refere-se à estabilidade da corrente em um determinado valor de amplitude, podendo ainda sofrer com pequenas variações, porém nada comparado ao regime transitório.

Dentre as características específicas da corrente de uma FAI que ocorrem mais comumente no regime transitório estão as etapas *buildup* e *shoulder*. *Buildup* consiste em períodos de aumentos graduais de amplitude da corrente, enquanto *shoulder* refere-se a períodos em que a amplitude permanece constante. Essas etapas estão relacionadas, principalmente, à acomodação do condutor na superfície de alta impedância (NAKAGOMI, 2006).

A intermitência é o processo de extinção e reignição do arco elétrico, que ocorre usualmente durante o início da falta (regime transitório) (SANTOS, 2016). Em faltas que envolvem o contato do condutor com o solo, o arco elétrico é responsável por evaporar a umidade presente na superfície (SILVA, H., 2020) e, conseqüentemente, extinguir o arco, que só é reiniciado quando encontra outra área suficientemente úmida. Já em faltas que envolvem o contato com galho de árvores, a extinção e a reignição do arco podem ser ocasionadas pelo contato intermitente do arbusto com o condutor.

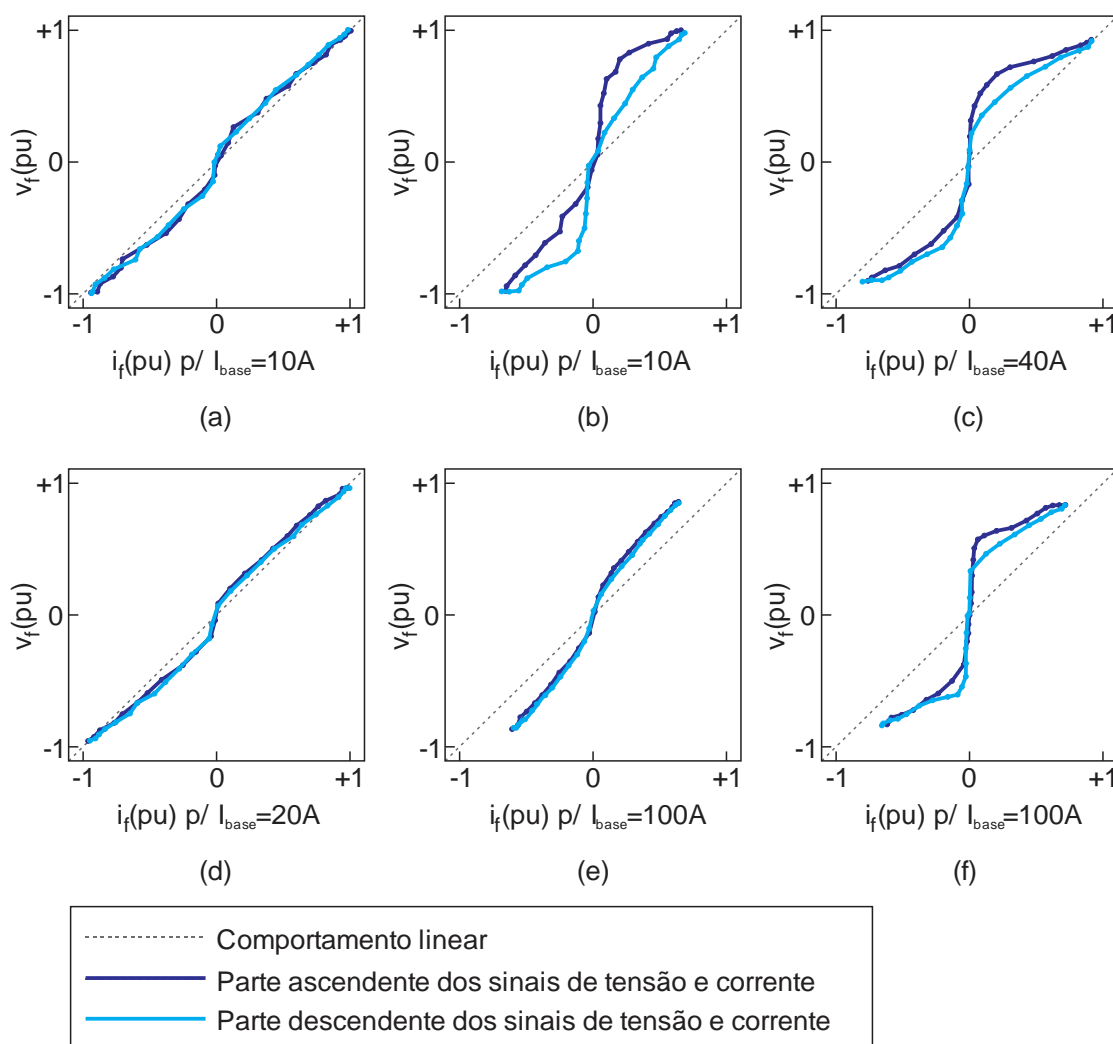
As características de assimetria e não linearidade, por sua vez, estão presentes em ambos os regimes da falta e possuem forte relação com as diversas distorções presentes na corrente da FAI. A assimetria refere-se, principalmente, à maior amplitude presente nos semiciclos positivos da corrente quando comparada com a de seus respectivos semiciclos negativos. Essa diferença é válida para qualquer corrente de falta, independentemente de sua amplitude. Segundo Emanuel et al. (1990), a assimetria é atribuída à porosidade, à umidade e à presença de sílica nas superfícies de alta impedância. A sílica, ao ser aquecida, forma uma espécie de “região catódica”, responsável por emitir elétrons que facilitam o rompimento do dielétrico do ar quando a tensão do condutor é positiva.

A não linearidade refere-se ao comportamento não linear da resistência de falta durante uma FAI. Apesar de possuir característica resistiva³, a FAI apresenta

³ Corrente e tensão em fase no ponto da falta.

distorções em sua relação $V \times I$ (tensão *versus* corrente) no ponto da falta que variam de acordo com a superfície de contato na qual ocorre o defeito. A Figura 2.2 apresenta curvas $V \times I$ para diferentes superfícies de contato, considerando uma tensão base de 13,8kV. É possível perceber a variedade de comportamentos encontrados, que envolvem desde características mais próximas da linearidade, como na areia, até curvas totalmente distorcidas, como no asfalto e no solo local. De acordo com Sultan, Swift e Fedirchuk (1994), a não linearidade ocorre com maior frequência em solos com menor umidade. As maiores causas do comportamento não linear da curva $V \times I$ são o movimento de partículas do solo, a própria movimentação do condutor, as variações na umidade do solo, entre outras.

Figura 2.2 – Curvas $V \times I$ Correspondentes a um Ciclo de FAI em cada Tipo de Superfície: (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) solo local



Fonte: Adaptado de Santos (2016).

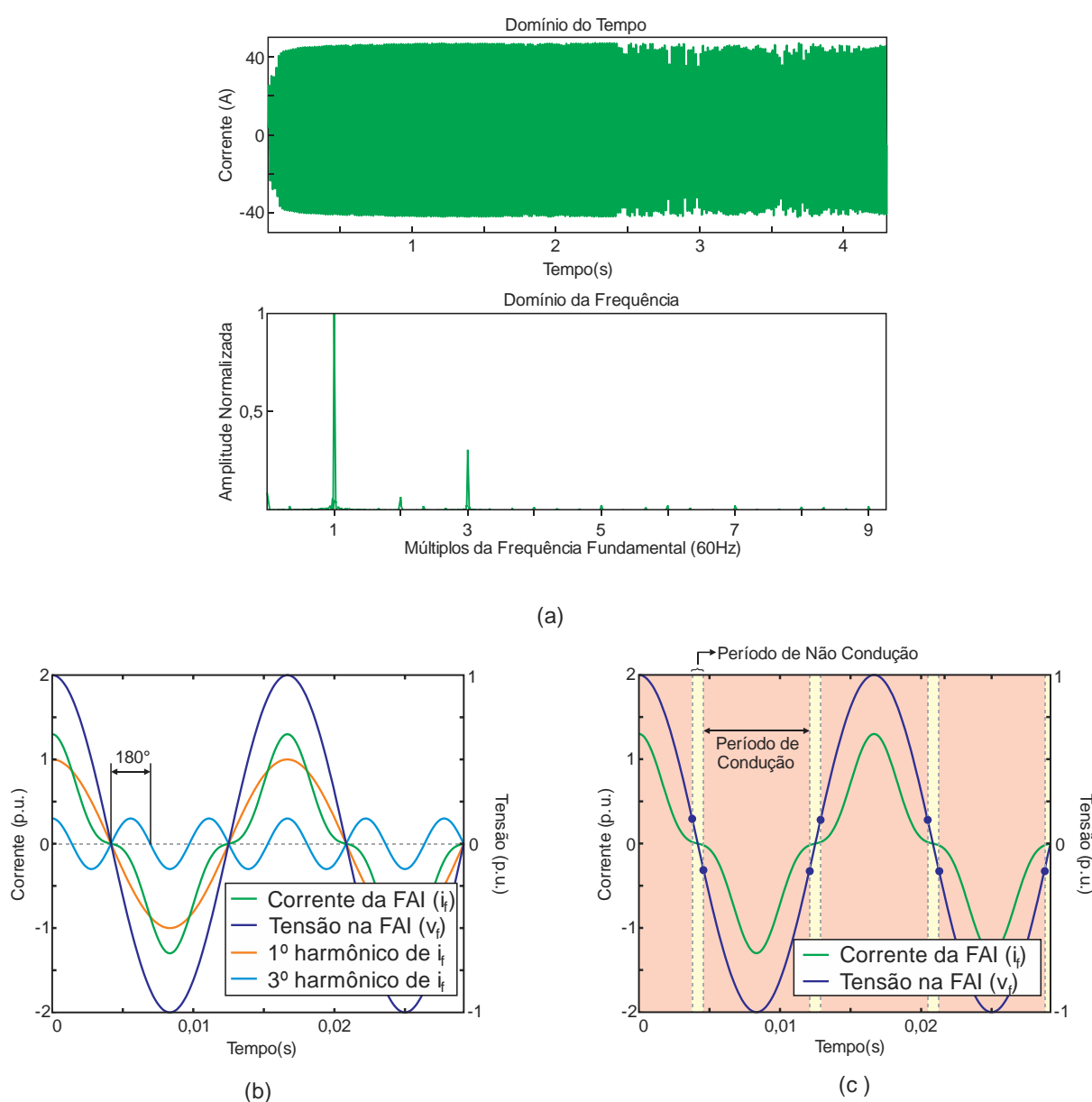
Todas as características presentes na corrente de falta são responsáveis por contribuir, de alguma forma, para o conteúdo harmônico presente nesse sinal. As alterações na amplitude da corrente de falta causadas, por exemplo, por etapas de *buildup* e *shoulders* provocam o surgimento de inter-harmônicos. A intermitência, por sua vez, contribui com harmônicos de alta frequência. Já a assimetria e a não linearidade geram harmônicos pares e harmônicos de baixa frequência (3^o ao 10^o), respectivamente (NAKAGOMI, 2006). A Figura 2.3a apresenta o conteúdo harmônico de uma corrente de falta de uma FAI. Nota-se que, após a componente fundamental, a terceira harmônica é a que apresenta maior magnitude, sendo essa uma característica comum em faltas de alta impedância. A terceira harmônica é uma das principais componentes a contribuir com a distorção da corrente de falta próxima ao seu cruzamento por zero (característica de correntes de arcos elétricos). Isso se deve ao fato de que a corrente de terceira harmônica geralmente encontra-se a cerca de 180° da componente fundamental da tensão, conforme Figura 2.3b. Assim, nos cruzamentos por zero da componente fundamental da corrente, a terceira harmônica está sempre em um sentido oposto de crescimento, fazendo com que a corrente de falta (somas dessas duas variáveis) apresente uma distorção próxima ao zero.

A distorção da corrente de falta próxima ao seu cruzamento por zero também pode ser analisada sob o ponto de vista da tensão no ponto de falta, conforme Figura 2.3c. Quando a magnitude da tensão é inferior a um determinado valor, não há diferença de potencial suficiente para que o arco se sustente, estabelecendo um período de não condução em que a corrente possui valores praticamente nulos. Quando a tensão do ponto da falta volta a atingir amplitudes maiores, o arco se restabelece, permitindo que a amplitude da corrente volte a crescer (período de condução). Dessa forma, fica clara a dependência da corrente da FAI em relação à tensão do ponto da falta.

Apesar de ter características bem definidas, a corrente de falta de uma FAI pode assumir comportamentos diversos dependendo da interação entre o arco elétrico e a superfície de alta impedância. Esse fato é ilustrado na Figura 2.4 por meio de duas diferentes oscilografias para uma mesma superfície de calçamento, sob as mesmas condições de ensaio. No primeiro caso, Figura 2.4a, tem-se um crescimento gradual e lento da corrente, com *buildups* e *shoulders* intercalados até que o regime permanente seja alcançado. Já na Figura 2.4b, o crescimento da corrente ocorre de forma rápida, alcançando o regime permanente em poucos ciclos. A diferença entre

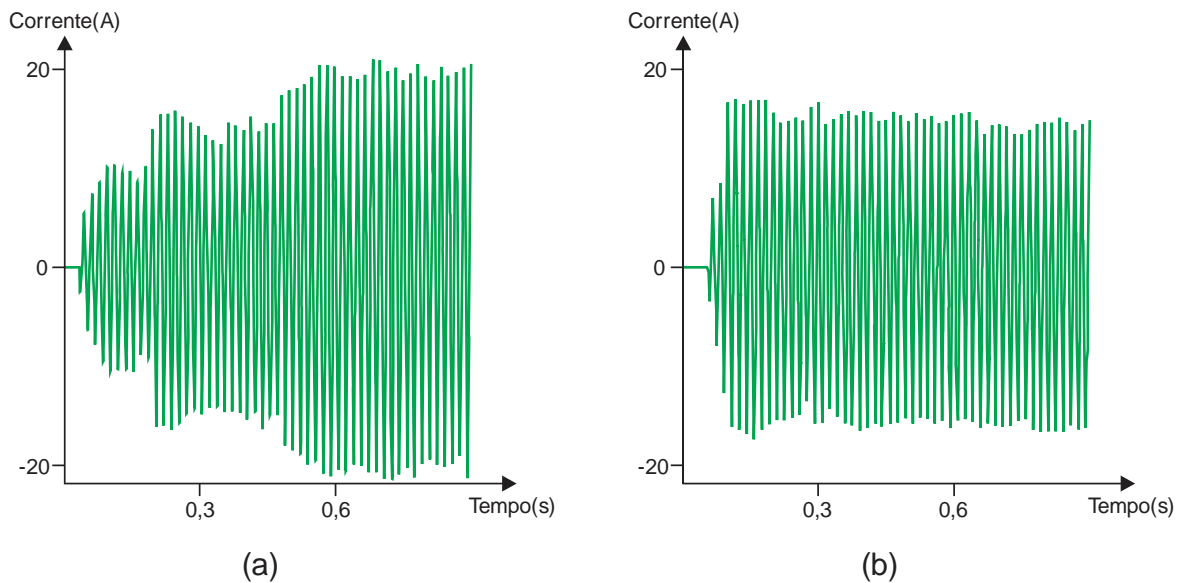
essas duas oscilografias indica mais uma característica importante das faltas de alta impedância, que é seu comportamento aleatório e dinâmico, no qual não há padrão, duração ou ordem para as características da corrente se manifestarem. A aleatoriedade da corrente não se limita apenas a alterações na amplitude, mas pode se manifestar também a partir de diferentes padrões de intermitência, assimetrias, distorções e alternância entre regimes transitórios e permanentes durante a falta.

Figura 2.3 – Análise da Corrente de Falta em uma FAI: (a) conteúdo harmônico; (b) ângulo da terceira harmônica; (c) períodos de condução e não condução



Fonte: (a) Adaptado de Lima (2016); (b) Adaptado de Liu et al. (2016); (c) O autor.

Figura 2.4 – Diferentes Comportamentos da Corrente de Falta: (a) crescimento gradual; (b) crescimento rápido



Fonte: Adaptado de Santos (2016).

2.3 CONFIGURAÇÕES DE FAI

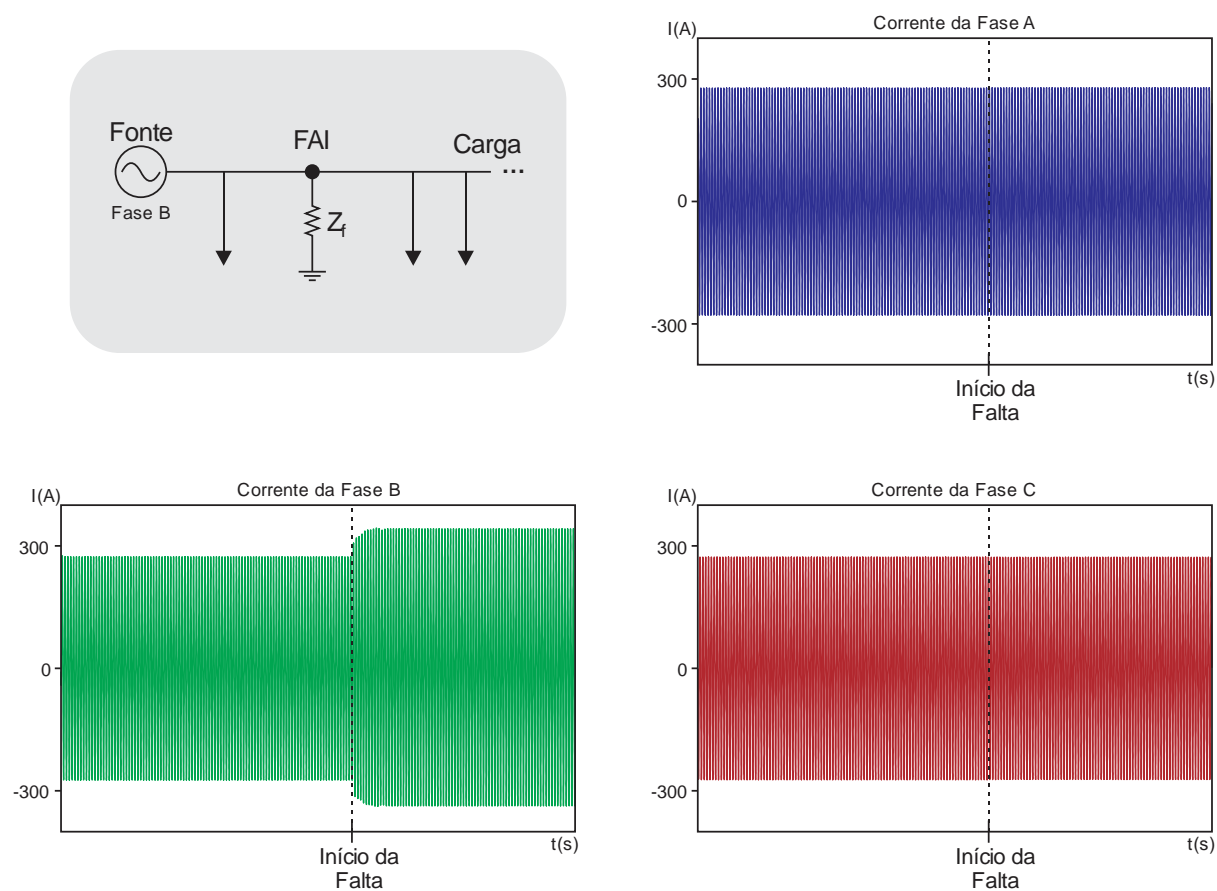
As faltas de alta impedância são, em sua maioria, monofásicas (THERON; PAL; VARGHESE, 2018). Considerando essa premissa, geralmente uma FAI pode ocorrer de acordo com quatro configurações distintas: falta em derivação (FD), falta em derivação-série com contato de alta impedância do lado da fonte (FDS-F), falta em derivação-série com contato de alta impedância do lado da carga (FDS-C) e falta em derivação-série com contato de alta impedância do lado da fonte e da carga (FDS-FC) (NAKAGOMI, 2006; OLIVEIRA et al., 2016).

2.3.1 Falta em Derivação (FD)

Faltas em derivação são aquelas em que o contato com a superfície de alta impedância é realizado sem que haja o rompimento do condutor. Um exemplo desse tipo de configuração são FAI provocadas pelo contato de árvores com a rede de distribuição. A Figura 2.5 apresenta o comportamento dessa configuração a partir de medições de corrente realizadas na subestação, considerando uma FAI na fase *B*. É possível notar, então, que, a partir da incidência da falta, a corrente na fase *B* começa

a apresentar as características específicas da FAI (como *buildups* e *shoulders*) somadas à corrente de carga do alimentador. Já as variações na corrente das fases sãs (A e C), que não participam da falta, acabam por ser imperceptíveis. Assim, em uma FAI na configuração FD, a variação de corrente (medida na subestação) na fase sob falta é muito maior que a variação encontrada nas fases sãs.

Figura 2.5 – FAI na Configuração FD



Fonte: O autor.

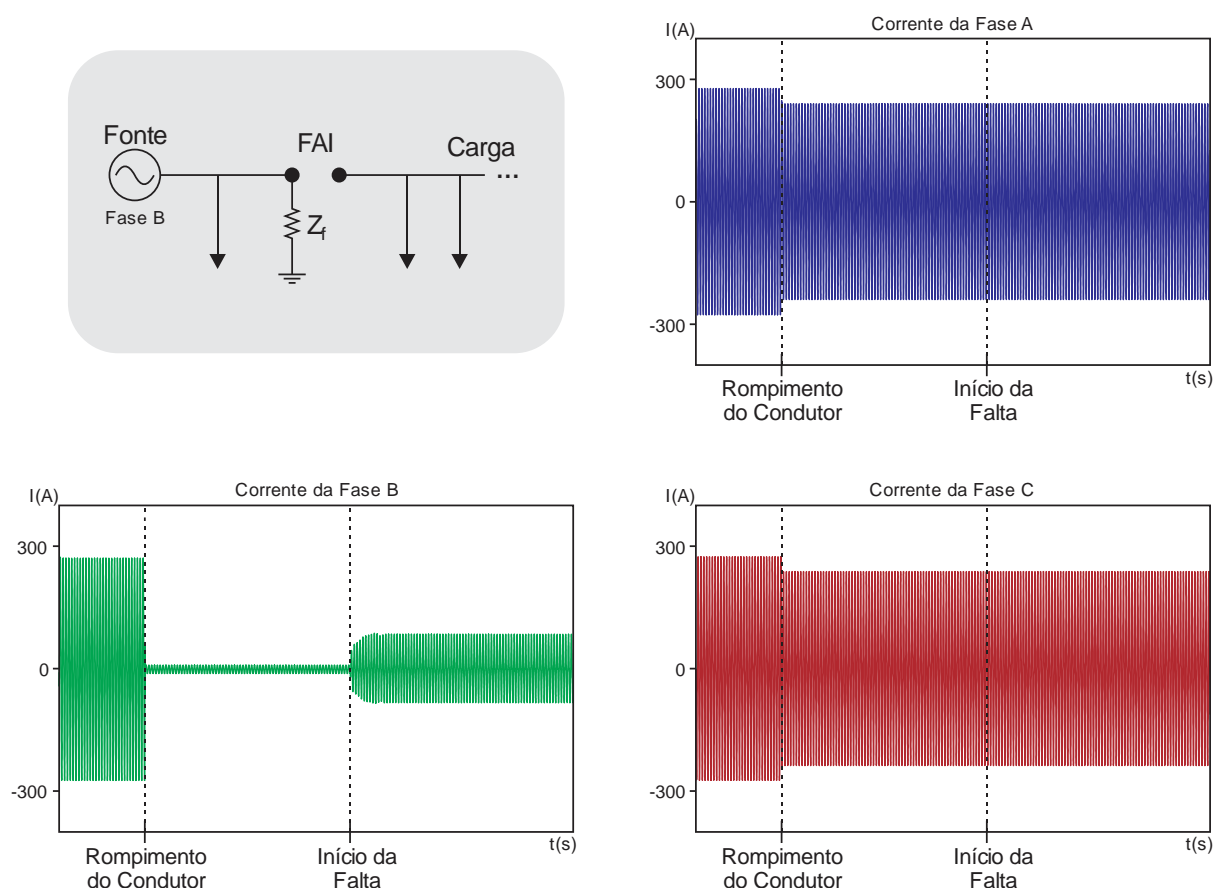
2.3.2 Falta em Derivação-série com Contato de Alta Impedância do Lado da Fonte (FDS-F)

Faltas em derivação-série são aquelas que reúnem características de defeitos em derivação com características de defeitos série⁴, ou seja, consideram o

⁴ Tipo de defeito em que ocorre apenas a abertura do circuito sem que contato algum com superfície seja estabelecido pelo condutor rompido.

rompimento do condutor e o posterior contato deste com uma superfície de alta impedância. No caso de uma FAI na configuração FDS-F, conforme Figura 2.6, o condutor se rompe e realiza o contato de alta impedância para o lado da fonte, isto é, para o lado da subestação. O rompimento do condutor pode ser causado, por exemplo, por redução de rigidez mecânica do condutor, degradação das estruturas de sustentação da rede, queda de árvores no vão entre os postes, entre outros motivos (SILVA, H., 2020). O tempo de queda do condutor varia de acordo com a altura entre a rede primária e a superfície de alta impedância, mas, considerando que a rede primária usualmente está entre 8m e 10m do solo, pode-se presumir que o tempo de queda seja cerca de 1,3s (NAKAGOMI, 2006).

Figura 2.6 – FAI na Configuração FDS-F



Fonte: O autor.

Nota-se, na Figura 2.6, que, a partir do instante de rompimento do condutor, há uma redução da corrente de carga do alimentador. Essa redução é perceptível nas

três fases, porém com maior efeito na amplitude da fase rompida (fase *B*). A redução na corrente de carga é dependente do ponto em que ocorreu o rompimento: quanto mais próximo da subestação, maior será a redução, uma vez que uma maior quantidade de carga será perdida. Após o rompimento, têm-se o intervalo de tempo de queda do condutor seguido do estabelecimento do contato de alta impedância (início da FAI). A partir do início da falta, a fase *B* começa a demonstrar as características específicas da FAI, enquanto as fases sãs apresentam pouca ou nenhuma variação de amplitude. Portanto, assim como na configuração FD, as faltas de alta impedância na configuração FDS-F também apresentam uma maior variação de corrente (medida na subestação) na fase sob falta do que nas fases sãs.

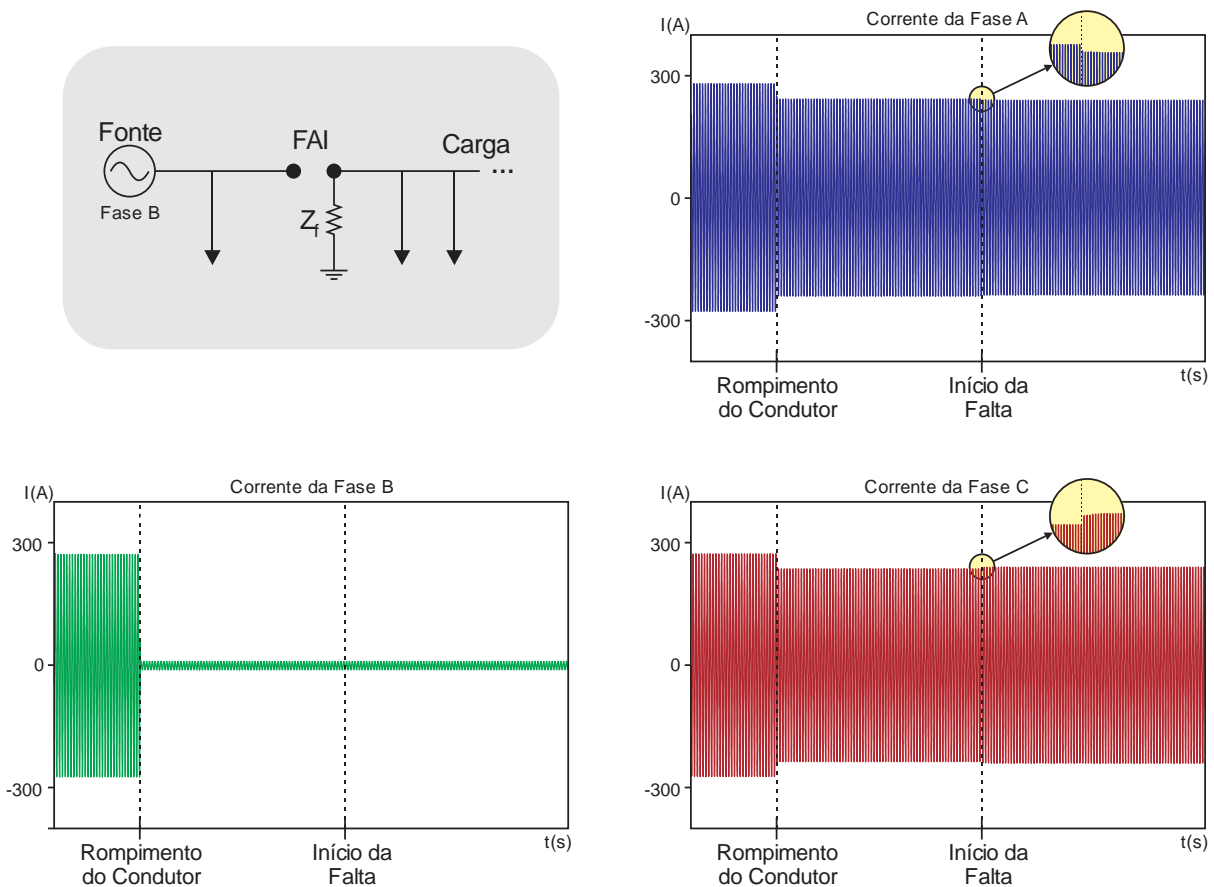
2.3.3 Falta em Derivação-série com Contato de Alta Impedância do Lado da Carga (FDS-C)

A configuração FDS-C também é um tipo de falta em derivação-série, porém, após o rompimento do cabo, este realiza o contato de alta impedância para o lado da carga, conforme demonstra-se na Figura 2.7. É possível notar que a FAI, na configuração FDS-C, também sofre os mesmos efeitos de perda de carga devido ao rompimento do condutor. Contudo, a partir do instante de estabelecimento da FAI, a fase sob falta (fase *B*) não apresenta significativas variações em sua amplitude, uma vez que não há contribuição direta da subestação para o defeito devido ao rompimento do condutor.

Nesse tipo de falta, diferentemente das outras configurações, as maiores variações de corrente (apesar de pequenas) são encontradas nas fases sãs representadas, na Figura 2.7, pelas fases *A* e *C*. Esse fato ocorre devido ao compartilhamento da impedância de falta entre as fases sãs através das conexões remanescentes entre as três fases, em transformadores trifásicos a jusante do ponto de falta. Tais transformadores são responsáveis por induzir a tensão no condutor rompido (que geralmente é inferior à tensão nominal do alimentador), o que acaba provocando uma corrente de falta de pequena magnitude, justificando as sutis variações encontradas nas fases sãs quando medidas na subestação. Caso a falta ocorra após o último transformador trifásico do alimentador, não haverá tensão induzida no condutor rompido, e, portanto, este permanecerá deserneizado, sem que

haja corrente de falta nem alterações em nenhuma das correntes das fases após o início da FAI (SILVA, H., 2020).

Figura 2.7 – FAI na Configuração FDS-C



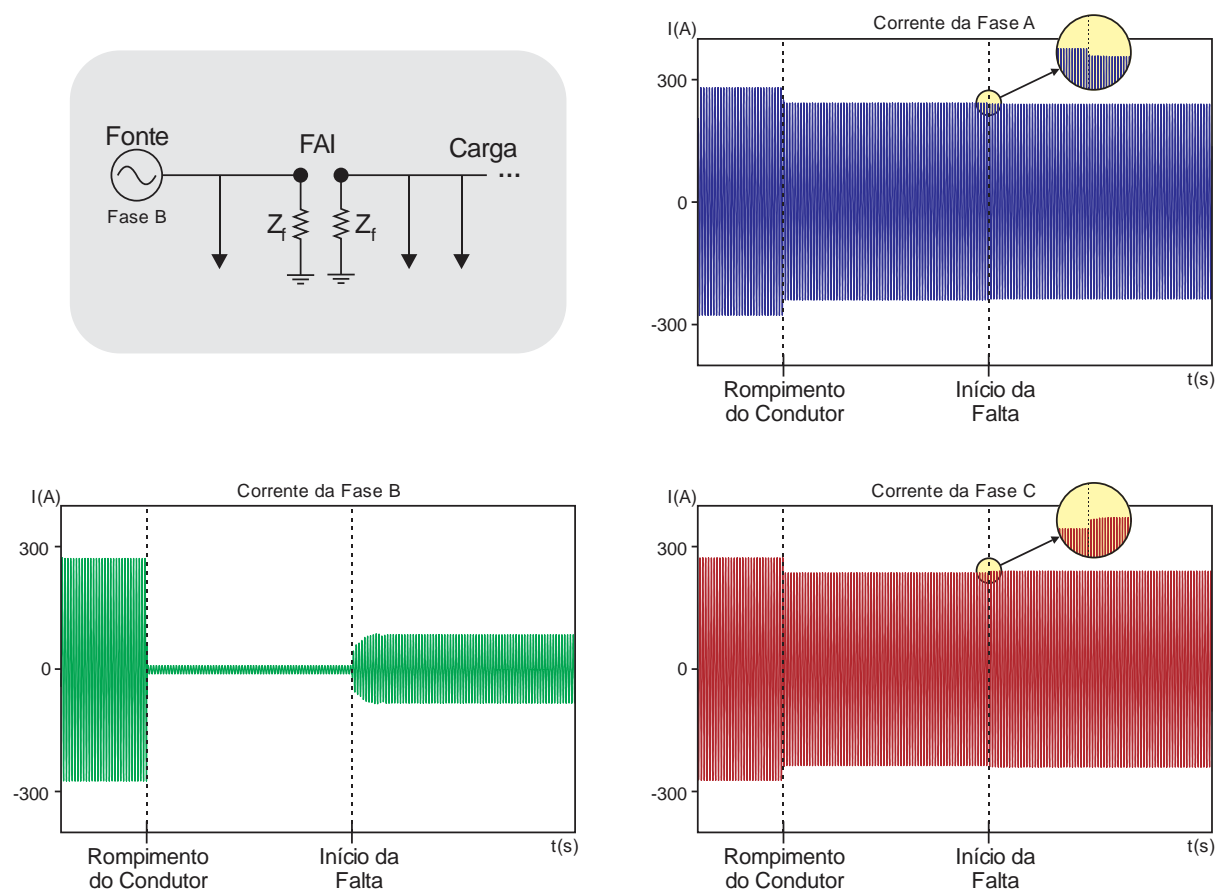
Fonte: O autor.

2.3.4 Falta em Derivação-série com Contato de Alta Impedância do Lado da Fonte e da Carga (FDS-FC)

A configuração FDS-FC representa um tipo de falta em derivação-série em que, após o rompimento do condutor, o contato de alta impedância é realizado tanto para o lado da fonte quanto para o lado da carga, conforme Figura 2.8. Portanto, esse tipo de defeito reúne, ao mesmo tempo, características das configurações FDS-F e FDS-C. A fase sob falta (fase B na Figura 2.8) apresenta as mesmas características da configuração FDS-F, enquanto as fases sãs (fases A e C na Figura 2.8) têm o mesmo comportamento encontrado na configuração FDS-C. Dessa forma, em faltas de alta

impedância na configuração FDS-FC, tem-se novamente uma variação de corrente medida na subestação na fase sob falta maior que a variação encontrada nas fases sãs.

Figura 2.8 – FAI na Configuração FDS-FC



Fonte: O autor.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentadas as principais características de uma FAI. Foi abordada a interação que ocorre entre o condutor e a superfície de alta impedância no momento da falta, de modo a elencar e caracterizar os fenômenos de *buildup*, *shoulder*, intermitência, não linearidade, assimetria e aleatoriedade, que são característicos de uma corrente de FAI. Foi possível perceber o impacto da presença do terceiro harmônico na corrente de FAI, bem como a relação entre tensão e corrente no ponto da falta. Por fim, foram apresentadas as principais configurações nas quais

uma FAI pode ocorrer, de modo a caracterizá-las em relação ao efeito que provocam nas medições de corrente realizadas a partir da subestação de um alimentador de distribuição.

3 ESTADO DA ARTE DA DETECÇÃO E SELEÇÃO DE FASES PARA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os processos de detecção e seleção de fases para faltas em sistemas de transmissão ou distribuição são realizados anteriormente à etapa de localização do defeito. A detecção preza por indicar a presença da falta no circuito. Já a seleção de fases mostra em qual das fases do sistema a falta ocorreu. Porém, caso o detector seja capaz de indicar a fase sob defeito, não há a necessidade do uso de um selecionador de fases. De forma análoga, se o selecionador for capaz de distinguir circuitos com e sem falta, não é preciso utilizar um detector.

Em faltas de alta impedância, na maioria das vezes, o detector de faltas é empregado por fases, ou seja, a própria detecção funciona como um selecionador. Sendo assim, neste capítulo, será apresentado o estado da arte dos detectores de faltas de alta impedância, e, posteriormente, serão discutidas suas respectivas capacidades em relação à seleção de fases.

3.2 METODOLOGIAS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

O processo de detecção de faltas pode ser dividido em três etapas: medição, extração de características e tomada de decisão (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017). A etapa de medição refere-se à variável a qual será analisada pelo método, sendo geralmente empregado o uso de corrente ou tensão (ou, ainda, corrente e tensão). A extração de características, por sua vez, utiliza de algum artifício para analisar uma ou mais características de interesse no sinal medido, como, por exemplo, o uso da transformada de Fourier para extração de componentes harmônicas de um sinal. A tomada de decisão é a etapa final da detecção, que indica a presença da FAI no circuito. Essa tarefa envolve a análise das características extraídas dos sinais medidos através de comparações com valores de referência (*thresholds*), uso de redes neurais artificiais, lógicas Fuzzy, classificadores estatísticos, entre outros.

De acordo com o domínio em que se é realizada a extração das características dos sinais, medidos em técnicas de detecção de FAI, têm-se cinco grandes grupos:

técnicas no domínio do tempo, técnicas no domínio da frequência, técnicas no domínio tempo-frequência, técnicas no domínio tempo-escala e técnicas híbridas.

3.2.1 Técnicas no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo avalia as distorções e irregularidades presentes em formas de onda sob a influência da FAI. São exemplos de análise no domínio do tempo: comparação de magnitude e valor eficaz, análises estatísticas, morfologia matemática, entre outros.

Em Sultan, Swift e Fedirchuk (1992), é proposto um método de detecção de FAI cujo objetivo é monitorar a corrente de cada fase do alimentador. Primeiramente, o método verifica se o valor eficaz de ciclo atual do sinal de corrente é suficientemente superior ao valor eficaz do ciclo anterior. Em caso positivo, o sinal de corrente é então analisado por uma rede neural artificial (RNA) *feedforward* previamente treinada com sinais oriundos de FAI e cargas não lineares. A entrada da RNA é um vetor que contém um ciclo do sinal de corrente, além de uma variável que mede a largura do período de condução da corrente. O método considera como período de condução o trecho em que a corrente possui valor instantâneo superior a 30% do seu valor de pico. Assim, a RNA permite reconhecer os padrões da FAI que possuem uma característica de alternância entre os períodos de condução e de não condução bem definida. A tomada de decisão é realizada comparando a resposta da rede neural com um valor de referência (*threshold*), e, caso a resposta seja superior a este durante 10 ciclos (tempo de espera⁵), a condição de FAI é estabelecida. Esse método apresenta a capacidade de diferenciação entre as correntes oriundas de FAI e alguns tipos de cargas não lineares. Os autores afirmam que a porcentagem de corretas detecções de FAI apresentadas pelo método foi superior a 75%.

Em Sarlak e Shahrtash (2011), também se utiliza uma RNA para a tomada de decisão do método, porém a extração das características dos sinais de corrente do alimentador é realizada por meio do gradiente morfológico de multirresolução. Esse gradiente combina operações de dilatação e erosão, típicas da morfologia matemática, de modo a extrair as irregularidades presentes nos sinais de corrente. O método analisa o sinal em períodos de 1,5 ciclos, subdivididos em três janelas de meio

⁵ Tempo total no qual uma condição deve ser obedecida. No aspecto da detecção, é o período de tempo em que a condição deve permanecer verdadeira para a indicação da FAI.

ciclo cada. Em cada janela, são calculados os respectivos gradientes de multirresolução que posteriormente serão comparados com valores de referência para averiguar a presença de uma condição de distúrbio. Uma vez que a condição de distúrbio é confirmada, os gradientes de cada janela passam a ser analisados por uma RNA *perceptron* de multicamadas, que realiza a tomada de decisão final. Segundo os autores, a taxa de detecção de FAI do método é de 98,3% de acertos. O método também foi submetido a outros transitórios, oriundos de chaveamento de banco de capacitores, energização de transformadores, chaveamento de carga, entre outros. Ao todo, cerca de 96,3% desses transitórios não sensibilizaram o método de detecção.

O uso da morfologia matemática também é praticado em Gautam e Brahma (2013). Esse método utiliza a operação CODO (do inglês *Closing Opening Difference Operation*) para extrair as distorções nos sinais de tensão sob a influência de uma FAI. A operação CODO é o cálculo da diferença entre as operações de abertura e fechamento que, por sua vez, são baseadas nas operações tradicionais de erosão e dilatação da morfologia matemática. Os autores optaram por utilizar a análise dos sinais de tensão, pois, afirmam eles, esses sinais não sofrem a influência da corrente pré-falta do sistema quando medidos na subestação. A detecção de FAI é realizada através da comparação do resultado da operação CODO com um valor de referência durante um determinado tempo de espera (cerca de 1s). Os resultados apresentados pelo método mostraram que o uso do tempo de espera permite que uma FAI seja diferenciada de chaveamento de banco de capacitores e chaveamento de carga. Além disso, o método conseguiu detectar 100% das faltas de alta impedância às quais foi submetido.

O método de detecção apresentado em Leite (2017) faz uso de vários medidores inteligentes instalados ao longo do alimentador, que monitoram as tensões entre fases no secundário de transformadores. A detecção é realizada através da análise do desequilíbrio entre as tensões (sinais instantâneos). O autor afirma que o rompimento de condutores em faltas de alta impedância elevam suficientemente o grau de desequilíbrio no alimentador para ser diferenciado da presença de cargas desequilibradas no circuito. Dessa forma, uma FAI é detectada quando o grau de desequilíbrio, em algum ponto do alimentador, supera 30% (valor de referência). Esse método permite apenas a detecção de faltas que envolvem o rompimento do condutor, sem sofrer influência do lado em que ocorre o contato de alta impedância. Assim sendo, faltas do tipo em derivação (FD) não são detectadas por essa metodologia.

Nezamzadeh-Ejeh e Sadeghkhani (2020) utilizam uma ferramenta diferente para a extração das características dos sinais de corrente do alimentador: a divergência de Kullback-Leibler. Essa metodologia estatística permite medir a distância entre duas distribuições probabilísticas e é aplicada para medir a diferença entre distribuições de dois semiciclos consecutivos de corrente. O método de detecção de Nezamzadeh-Ejeh e Sadeghkhani (2020) parte do pressuposto de que, sob a ação de uma FAI, a corrente medida na subestação dificilmente apresentará um semiciclo igual ao outro devido às assimetrias da forma de onda, que possibilitam, assim, a detecção da falta. A divergência de Kullback-Leibler é calculada a partir de um coeficiente que deve permanecer acima de um valor de referência durante um tempo de espera de 100ms para que a FAI seja detectada. Esse tempo de espera se demonstrou suficiente para a diferenciação entre a FAI e chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de carga, energização de linhas, presença de geração distribuída, entre outros. Os autores apresentam também uma comparação entre o desempenho da divergência de Kullback-Leibler e outros métodos, inclusive o uso de operações CODO de Gautam e Brahma (2013). Concluiu-se que o uso de operações CODO pode indicar a presença de FAI indevidamente perante chaveamentos de cargas não lineares, fato que não ocorre com a utilização da divergência de Kullback-Leibler.

3.2.2 Técnicas no Domínio da Frequência

As técnicas de detecção de faltas de alta impedância no domínio da frequência referem-se principalmente à extração do conteúdo harmônico presente nos sinais de tensão e corrente. Essa classe de métodos geralmente compara o conteúdo harmônico de uma FAI com o conteúdo harmônico de outros transitórios ou, ainda, do regime permanente do alimentador de forma a tentar diferenciar esses eventos. A variação desses métodos se dá na faixa de frequência escolhida para análise, bem como no artifício utilizado para extração das características dos sinais.

Aucoin e Russell (1982) apresentam um estudo relacionado à análise das correntes do alimentador sob a faixa de alta frequência entre 2kHz e 10kHz. Essa faixa de frequência demonstra um grande crescimento durante uma FAI que perdura enquanto houver a presença do arco elétrico. Assim, os autores utilizam a duração desse crescimento das componentes de alta frequência para diferenciar a FAI de

outros tipos distúrbios. Por exemplo, chaveamentos de banco de capacitores também apresentam um crescimento de componentes de alta frequência, porém durante um período de tempo muito inferior ao da FAI. Os resultados apresentados demonstraram a fragilidade do método principalmente perante correntes inferiores a 10A, bem como sob a presença de bancos de capacitores em ligação estrela aterrada, que acabam por atenuar as componentes de alta frequência que chegam até a subestação. Esse problema de atenuação foi posteriormente resolvido em Aucoin e Russell (1987), quando os mesmos autores substituíram o uso de altas frequências pelas inter-harmônicas dos sinais de corrente, localizadas em uma faixa entre 10Hz e 300Hz.

Em Balser, Lawrence e Clements (1986), é proposto um algoritmo para detecção de FAI por meio do uso do teste Z, que permite verificar diferenças estatísticas entre uma observação e o restante do comportamento da população. Nesse algoritmo, são utilizados coeficientes de Fourier para a primeira, a terceira e a quinta harmônica, que posteriormente são transformados em componentes simétricas. Para calcular o teste Z, são utilizadas as componentes simétricas não características de cada harmônica, de forma a agrupá-las em um único índice Z, que é então comparado com um valor de referência para realizar a indicação da presença da FAI no sistema. Esse método parte do princípio de que, sob a ação de uma FAI, as correntes do sistema se alteram suficientemente para aumentar o grau de desequilíbrio do circuito e, conseqüentemente, também aumentar a influência das componentes simétricas não características de cada harmônica. Sendo assim, a ocorrência de uma FAI altera o valor do índice Z o bastante para diferenciá-la do estado normal de operação do sistema. Os resultados demonstrados pelos autores indicaram uma probabilidade de 90% de correta detecção para FAI com correntes acima de 10A.

Zadeh (2005) demonstra um método com base na análise da segunda e da terceira harmônicas das correntes e tensões residuais do alimentador, sinais que geralmente apresentam crescimento devido a FAI. Primeiramente, os sinais de corrente e tensão das três fases passam por um filtro passa-baixa com frequência de corte de 450Hz, que tem por objetivo evitar fenômenos de *aliasing*⁶. A seguir, são

⁶ *Aliasing* refere-se ao efeito gerado quando a frequência de amostragem de um sinal, ou seja, o número de amostras por segundo, não obedece ao Teorema de Amostragem de Nyquist. Esse teorema estabelece que a frequência de amostragem de um sinal deve ser pelo menos duas vezes superior à maior frequência contida nesse sinal (HAYKIN; MOHER, 2011).

estimados os valores dos sinais residuais, sendo a corrente residual a soma das correntes das três fases, assim como a tensão residual é referente à soma das três tensões de fase. A partir dos sinais residuais, são calculadas suas respectivas componentes harmônicas de segunda e terceira ordem através do uso de uma Transformada Discreta de Fourier (TDF) de ciclo completo. Os harmônicos são então utilizados com entrada de uma RNA previamente treinada por meio do método de Levenberg-Marquardt, que realiza a tomada de decisão, indicando ou não a presença da FAI no sistema. Segundo o autor, o método proposto não gerou nenhuma resposta falso-positiva perante fatores como chaveamentos de banco de capacitores, chaveamento de carga e troca de *tap* em transformadores.

Samantaray, Dash e Upadhyay (2009) abordam um método de detecção de faltas de alta impedância para sistemas com a presença de cargas não lineares. Tanto uma FAI quanto uma carga não linear podem gerar conteúdos harmônicos muito semelhantes, de modo a dificultar sua diferenciação. Dessa forma, os autores sugerem a utilização de uma faixa de harmônicas ímpares, da terceira harmônica até a décima terceira, para a detecção da FAI. As harmônicas são extraídas a partir dos sinais de corrente do alimentador com o uso de um filtro estendido de Kalman. O conteúdo harmônico é então analisado por uma RNA previamente treinada com mais de 300 casos de correntes oriundas de FAI e cargas não lineares. Nesse trabalho, foi avaliado o uso de dois tipos de RNA: uma do tipo *feedforward* e outra do tipo probabilística. Ao final, os resultados apresentados pelos autores mostraram que a RNA do tipo probabilística obteve melhores resultados, alcançando uma porcentagem de detecção correta de faltas de cerca de 99%.

O método apresentado em Chakraborty e Das (2019) é baseado na instalação de diversos medidores inteligentes ao longo do alimentador, que possuem o objetivo de estimar as harmônicas pares dos sinais de tensão através do uso de uma TDF. A partir dessas harmônicas, é calculado um índice de distorção de harmônicas pares. Os autores afirmam que, em condições normais de operação, esse índice apresenta valores muito inferiores aos índices de distorção provocados por uma FAI. Assim, para que a FAI seja detectada, é necessário que o índice de distorção de harmônicas pares permaneça superior a um valor de referência durante o tempo de espera de 1s. Com o uso desse tempo de espera, foi possível diferenciar as faltas de alta impedância de chaveamento de banco de capacitores e de carga, energização de linhas e transformadores, presença de cargas não lineares, entre outros.

3.2.3 Técnicas no Domínio Tempo-frequência

Técnicas de detecção no domínio tempo-frequência extraem as características dos sinais medidos tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Um exemplo desse tipo de técnica é a transformada de Fourier de tempo curto – ou STFT, do inglês *short-time Fourier transform* –, a qual consiste em uma variação da TDF em que uma função janela de tamanho fixo percorre todo o sinal, extraíndo suas características. Ainda nesse domínio, existem técnicas que fornecem uma melhor resolução tempo-frequência quando comparadas à STFT, como, por exemplo, a distribuição de Choi-Willians.

Ghaderi et al. (2015) utilizam a distribuição de Choi-Willians para a extração das características tempo-frequência dos sinais de corrente do sistema. Primeiramente, a componente fundamental de frequência da corrente é removida desses sinais através do ajuste de curvas com o objetivo de aumentar ainda mais a resolução tempo-frequência do sinal. Isso faz com que um maior espaço do espectrograma esteja disponível para as outras faixas de frequência. A seguir, a distribuição de Choi-Willians é aplicada a cada um quarto de ciclo dos sinais de corrente para obter pelo menos um momento de transição entre os períodos de condução e não condução, momento este rico em conteúdo harmônico para a utilização na detecção da FAI. Posteriormente, são realizadas algumas etapas para refinar a resposta obtida na distribuição de Choi-Willians. Por fim, uma máquina de vetor suporte é utilizada para a tomada de decisão final do método. Ao total, o algoritmo apresentou 100% de faltas de alta impedância detectadas corretamente. Já o número de operações falso-positivas foi de 18,5% perante fatores como energização de transformadores, cargas não lineares, chaveamento de banco de capacitores, entre outros.

Lima (2016) faz uso da STFT para a obtenção do módulo e do ângulo da terceira harmônica dos sinais de corrente do alimentador. O ângulo da terceira harmônica é calculado em relação à componente fundamental de tensão, uma vez que, em uma FAI, esse valor está próximo a 180° , conforme anteriormente apresentado na Figura 2.3b. A FAI pode ser detectada por dois critérios: se o módulo da terceira harmônica apresentar crescimento acima de um valor de referência por mais de cinco ciclos ou se o ângulo da terceira harmônica apresentar abrupta variação abaixo de um valor de referência também por cinco ciclos (tempo de espera). Caso

apenas o primeiro critério seja obedecido, analisam-se ainda os módulos da segunda e da quinta harmônicas a partir de novos valores de referência, uma vez que o crescimento da amplitude da terceira harmônica não é exclusivo de faltas de alta impedância. Os resultados obtidos pelo método demonstraram a importância do critério relativo ao ângulo da terceira harmônica que apresenta melhor desempenho para FAI com corrente de falta muito pequena, pois, nesses casos, o critério do crescimento do módulo da terceira harmônica não é satisfeito. Ainda, o método detectou corretamente todos os casos de FAI aos quais foi submetido, bem como não apresentou respostas falso-positivas perante transitórios oriundos de chaveamento de banco de capacitores e energização de linhas.

3.2.4 Técnicas no Domínio Tempo-escala

As técnicas representantes do domínio tempo-escala são as transformadas de Wavelet (TW), que utilizam uma função janela de comprimento variável (chamada de wavelet mãe) para também extrair as características tempo-frequência dos sinais medidos. É possível aplicar uma escala à função janela, de modo a tornar seu comprimento maior ou menor, sendo possível atingir diferentes resoluções de tempo e frequência. Por exemplo, sinais de alta frequência variam sua amplitude mais rapidamente que sinais de baixa frequência. Dessa forma, uma função janela de tamanho fixo (como a STFT) não seria adequada para analisar os dois sinais. As TW utilizam funções janela mais estreitas para altas frequências e mais largas para baixas frequências. Isso promove alta resolução em tempo com baixa resolução em frequência para altas frequências e baixa resolução em tempo e alta resolução em frequência para baixas frequências. Acredita-se que cerca de 40% dos métodos de detecção de FAI são realizados no domínio tempo-escala (GHADERI; GINN; MOHAMMADPOUR, 2017).

O método apresentado em Michalik et al. (2006) utiliza uma TW contínua com wavelet mãe do tipo Morlet, que extrai as características dos sinais de corrente residual e tensão residual do sistema. Esse método tem por objetivo analisar os transitórios de alta frequência que ocorrem em corrente e tensão ao longo dos sucessivos períodos de extinção e reignição do arco elétrico durante uma FAI (alternância entre os períodos de condução e não condução). Os autores sugerem a medição do deslocamento de fase entre os coeficientes de wavelet de tensão e

corrente como indicativo para a detecção da FAI. A partir dessa variável, são sugeridos dois tipos de algoritmos para a tomada de decisão: o primeiro deles utiliza valores de referência e tempo de espera (0,1s), enquanto o segundo faz uso de uma RNA. Os resultados demonstraram que a tomada de decisão com a utilização da RNA foi mais rápida quando comparada ao outro esquemático. De qualquer forma, ambos os algoritmos de tomada de decisão foram submetidos a transitórios de chaveamentos de capacitores e energização de linhas, e não houveram registros de atuações falso-positivas.

É comum, no uso de TW, a variação do tipo de wavelet mãe utilizada em cada método de detecção de FAI. Os diversos formatos e tipos de wavelets mãe permitem a extração das características tempo-frequência de modos diferentes. Em Santos (2016), é utilizada um wavelet mãe do tipo Daubechies4, responsável por extrair os coeficientes de detalhe e aproximação (em primeiro nível) dos sinais de tensão em vários pontos do alimentador. Para que a detecção da FAI seja realizada, é necessário que a energia do coeficiente de detalhe permaneça superior a um valor de referência durante um tempo de espera total de 150ms, que auxilia na diferenciação entre uma falta e outros tipos de distúrbios. Posteriormente, para que a FAI não seja confundida com faltas de baixa impedância, utiliza-se a energia do coeficiente de aproximação. Faltas de baixa impedância geralmente apresentam um afundamento de tensão superior ao de uma FAI. Logo, para que ocorra essa diferenciação, basta que a energia do coeficiente de aproximação seja inferior a um determinado valor de referência (durante 150ms), configurando, assim, uma FAI. Esse método demonstrou-se capaz de diferenciar faltas de alta impedância de presença de geração distribuída, faltas de baixa impedância, energização de linhas, chaveamentos de bancos de capacitores e faltas sólidas simultâneas a uma FAI.

Outra estratégia utilizada na detecção de FAI é o uso de metodologias que derivam da TW, como, por exemplo, a transformada de Stockwell (ou transformada S). A transformada S soluciona alguns problemas, como a falta de informação da fase da TW e a resolução fixa de uma STFT. Em Lima, Brito e Souza (2019), a transformada S é utilizada para analisar os sinais de corrente medidos a partir da subestação. Seu uso resulta em uma matriz com o conteúdo tempo-frequência de cada sinal, conhecida como matriz S. A partir dessa matriz, são extraídos um total de sete parâmetros, sendo um deles o módulo da terceira harmônica. Para a indicação da FAI, cada um desses parâmetros deve obedecer a um valor de referência

específico. Nesse trabalho, também é utilizado um tempo de espera de 150ms para auxiliar na distinção entre FAI e outros distúrbios. Os autores submeteram o algoritmo proposto a faltas de baixa impedância, chaveamento de banco de capacitores e energização de linhas, e não foram relatadas falsas operações perante estes casos.

3.2.5 Técnicas Híbridas

As técnicas híbridas são aquelas que combinam duas ou mais técnicas de outros domínios para extrair as características dos sinais utilizados para a detecção da FAI. Geralmente, devido ao uso de diversos métodos ao mesmo tempo, técnicas híbridas têm uma maior complexidade quando comparadas com os outros grupos, porém elas permitem a obtenção de uma maior quantidade de características da FAI, facilitando as tarefas de detecção e diferenciação de outros transitórios. Dentre os diversos trabalhos que abordam técnicas híbridas, podem-se citar:

- Etemadi e Sanaye-Pasand (2008): realiza a análise dos sinais de corrente do alimentador, extraindo seu conteúdo de terceira harmônica (domínio da frequência), bem como seus respectivos coeficientes de detalhe, estes extraídos pela TW (domínio tempo-escala). Esses parâmetros são analisados por um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptável (do inglês *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System – ANFIS*), que é responsável pela indicação da FAI;
- Farias (2013): utiliza ferramentas como a malha de captura de fase (domínio do tempo) e a TW discreta (domínio tempo-escala) para a extração das características dos sinais de corrente medidos na subestação. A detecção da FAI é realizada através do uso de valores de referência adaptativos e uma RNA do tipo regressão generalizada;
- Soheili e Sadeh (2017): este método faz uso da extração de características dos sinais de corrente e tensão nos quatro domínios possíveis. Para os sinais de tensão do alimentador, são utilizadas análises por morfologia matemática. Já para os sinais de corrente utilizam-se a razão da componente simétrica de sequência zero pela positiva, a análise de harmônicas pares e ímpares através de TDF, as distorções de forma de onda por TW e a característica tempo-frequência por STFT. A tomada de

decisão é realizada através de um algoritmo de decisão multicritério, que analisa todas as respostas dessas diferentes abordagens.

3.3 ANÁLISE DA SELEÇÃO DE FASES E TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE FAI UTILIZADAS EM ALGORITMOS DETECTORES

O Quadro 3.1 apresenta algumas informações adicionais sobre os métodos de detecção de faltas de alta impedância abordados até o momento. Nele é possível analisar a capacidade individual que cada método possui em relação à seleção de fases. Do total de 19 métodos, 14 possuem a capacidade de seleção de fases, não por apresentarem um algoritmo específico para essa tarefa, mas porque o método de detecção pode ser aplicado separadamente em cada uma das fases do alimentador. Dessa forma, ao detectar a FAI, automaticamente a fase em que ocorreu a falta já é indicada. Porém é possível notar que alguns métodos não possuem a função de seleção de fases. Isso deve-se ao fato de que esses métodos, de alguma forma, realizam a combinação das informações das três fases para realizar a detecção, não sendo possível analisá-las separadamente.

Em Zadeh (2005) e Michalik et al. (2006), os sinais utilizados pelo algoritmo de detecção são a corrente e a tensão residuais, que são, respectivamente, a soma das correntes e tensões das três fases. Dessa forma, não é possível distinguir em qual das fases ocorreu a FAI. Já em Balsler, Lawrence e Clements (1986), a informação de cada fase é perdida devido ao uso da transformação para componentes simétricas, fato que também ocorre no estudo de Farias (2013), em que uma transformada de Clarke precede a entrada da malha de ajuste de fase. Por fim, Leite (2017) detecta faltas de alta impedância através do desequilíbrio de tensão do alimentador. O grau de desequilíbrio é um parâmetro que relaciona as tensões nas três fases, logo não pode ser calculado individualmente em cada uma delas.

Métodos de detecção que não possuem a capacidade de seleção de fases não são indicados para trabalhar juntamente com localizadores de FAI como o apresentado em Farias (2017). Esse tipo de localizador foi desenvolvido para ser aplicado apenas na fase sob falta, de forma que uma etapa precedente de seleção de fases é inerente ao método. O fato de a metodologia de detecção ser aplicada somente na fase sob falta também permite um menor esforço computacional para executar o algoritmo. Dessa forma, detectores sem a função de seleção necessitariam

obrigatoriamente de um algoritmo auxiliar de seleção de fases caso fossem utilizados em esquemas de proteção com localizadores de FAI aplicáveis por fase.

Quadro 3.1 – Características Extras dos Métodos de Detecção de FAI

(continua)

Domínio do Tempo				
Referência	Sinal Utilizado	Seleção de Fases	Casos Reais ou Simulação	Configuração de FAI Analisada
Sultan, Swift e Fedirchuk (1992)	Corrente	Sim	Real	FD
Sarlak e Shahrtash (2011)	Corrente	Sim	Real	FD e FDS-F
Gautam e Brahma (2012)	Tensão	Sim	Simulação	FD e FDS-F
Leite (2017)	Tensão	Não	Simulação	FD, FDS-F e FDS-C
Nezamzadeh-Ejeh e Sadeghkhanani (2020)	Corrente	Sim	Simulação	-
Domínio da Frequência				
Referência	Sinal Utilizado	Seleção de Fases	Casos Reais ou Simulação	Configuração de FAI Analisada
Aucoin e Russell (1982) e Aucoin e Russell (1987)	Corrente	Sim	Real	FD
Balsler, Lawrence e Clements (1986)	Corrente	Não	Simulação	FD e FDS-F
Zadeh (2005)	Tensão e Corrente residuais	Não	Simulação	FD
Samantaray, Dash e Upadhyay (2009)	Corrente	Sim	Simulação	FD
Chakraborty e Das (2019)	Tensão	Sim	Simulação	FD e FDS-F
Domínio Tempo-frequência				
Referência	Sinal Utilizado	Seleção de Fases	Casos Reais ou Simulação	Configuração de FAI Analisada
Ghaderi et al. (2015)	Corrente	Sim	Real	FD
Lima (2016)	Corrente	Sim	Real e Simulação	FD e FDS-F
Domínio Tempo-escala				
Referência	Sinal Utilizado	Seleção de Fases	Casos Reais ou Simulação	Configuração de FAI Analisada
Michalik et al. (2006)	Tensão e Corrente residuais	Não	Simulação	FD e FDS-F
Santos (2016)	Tensão	Sim	Real e Simulação	FD

Quadro 3.1 – Características Extras dos Métodos de Detecção de FAI

(conclusão)

Domínio Tempo-escala				
Referência	Sinal Utilizado	Seleção de Fases	Casos Reais ou Simulação	Configuração de FAI Analisada
Lima, Brito e Souza (2019)	Corrente	Sim	Real e Simulação	FD
Domínio Híbrido				
Referência	Sinal Utilizado	Seleção de Fases	Casos Reais ou Simulação	Configuração de FAI Analisada
Etemadi e Sanaye-Pasand (2008)	Corrente	Sim	Simulação	FD
Farias (2013)	Corrente	Não	Simulação	FD
Soheili e Sadeh (2017)	Corrente e Tensão	Sim	Simulação	FDS-F

Fonte: O autor.

O Quadro 3.1 também apresenta as características dos cenários utilizados para a validação dos algoritmos detectores, de forma que é possível averiguar os casos em que foram utilizados cenários relativos a experimentos reais ou oriundos de simulações. Mas o fato mais importante a ser observado é o tipo de configuração de FAI utilizada em cada um dos métodos, em que é clara a predominância do uso das configurações FD e FDS-F. Apenas o método de Leite (2017) considera faltas de alta impedância na configuração FDS-C, enquanto o tipo FDS-FC não é abarcado em nenhum dos trabalhos pesquisados. Esta é uma característica recorrente no ramo de detecção de FAI: dificilmente são encontrados trabalhos que apresentem resultados ou metodologias específicas para configurações de FAI do tipo FDS-C e FDS-FC, sendo essa, portanto, uma lacuna ainda a ser explorada neste ramo de pesquisa. É possível que o desempenho de muitos dos algoritmos detectores existentes seja influenciado pelas configurações FDS-FC e, principalmente, FDS-C, uma vez que este último tipo é o que apresenta as menores alterações tanto em corrente quanto em tensão (medidos na subestação) quando comparado ao restante das configurações. Além disso, grande parte dos métodos abordados neste capítulo fazem uso de valores de referência, logo é muito provável que esses limiares necessitem de alterações quando aplicados a uma FAI na configuração FDS-C.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou um panorama sobre a detecção de defeitos no âmbito de falhas de alta impedância. Foi possível averiguar a diversidade de métodos existentes na literatura e classificá-los em cinco grandes grupos com base nas técnicas no domínio do tempo, no domínio da frequência, no domínio tempo-frequência, no domínio tempo-escala ou híbridas. Apesar da variedade de domínios, é comum encontrarem-se nesses métodos características como a presença de comparações com valores de referência, bem como o uso de tempos de espera para diferenciar uma FAI de outros tipos de transitórios. Os métodos de detecção, sejam eles de qualquer tipo de domínio, demonstraram também a capacidade de selecionar as fases envolvidas no defeito na maioria das vezes. Porém algumas técnicas específicas não demonstraram tal habilidade, fazendo com que seja necessária a implementação de um algoritmo selecionador separado do detector, de forma a suprir suas deficiências relacionadas a seleção de fases.

Quanto aos tipos de configurações de FAI utilizadas para a validação dos algoritmos detectores existentes na literatura, foi possível perceber que a maioria dos estudos aborda apenas as configurações FD e FDS-F, sem apresentar seu desempenho perante os tipos FDS-C e FDS-FC, o que constitui um ramo ainda a ser explorado na detecção de FAI.

4 METODOLOGIA DE RELAÇÃO ANGULAR DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo, serão detalhados os conceitos sobre a detecção e a seleção de fases para FAI utilizando componentes simétricas e sua relação angular. Primeiramente, será apresentado o método de seleção de fases de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000), que foi utilizado como base para o desenvolvimento da metodologia proposta. Em seguida, abordar-se-á como o método de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) pode ser aplicado para faltas de alta impedância, destacando as alterações e os ajustes necessários para construir a metodologia proposta neste trabalho. Ao final, serão abordados os dois algoritmos desenvolvidos, um para a detecção de FAI e outro para a seleção de fases, ambos fundamentados na relação angular de componentes simétricas.

4.2 MÉTODO DE KASZTENNY, CAMPBELL E MAZEREEUW (2000)

A metodologia de seleção de fases apresentada em Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) foi originalmente desenvolvida para atuar no esquema de proteção de abertura monopolar em linhas de transmissão trifásicas. Esse esquema evita desligamentos trifásicos desnecessários que resultariam na interrupção completa no fornecimento de energia do sistema perante a ocorrência de faltas monofásicas temporárias. O desligamento monopolar permite que pelo menos dois terços da potência transmitida ainda seja mantida através das fases sãs (GODOY et al., 2012).

Para realizar a seleção de fases, o método de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) faz uso, primeiramente, da relação angular de componentes simétricas de corrente. As componentes simétricas, originalmente apresentadas em Fortescue (1918), são obtidas aplicando uma transformada linear às componentes de fase do sistema, conforme (4.1). A transformação de (4.1) origina componentes simétricas que são referenciadas em relação à fase A. Cada componente simétrica é então utilizada para a estimação de dois coeficientes de seleção: M_1 e M_2 . O coeficiente M_1 diz respeito ao valor do argumento da divisão entre os fasores das componentes de sequência negativa e positiva da corrente durante a falta, conforme (4.2). Já o coeficiente M_2 é referente ao argumento da divisão entre as componentes

de sequência negativa e zero, também durante a falta, de acordo com (4.3). O argumento de uma divisão de fasores é equivalente à diferença dos ângulos dos fasores do numerador e denominador.

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_0 \\ \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{I}_{a0} \\ \vec{I}_{a1} \\ \vec{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ \vec{I}_b \\ \vec{I}_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$M_1 = \arg\left(\frac{\vec{I}_2}{\vec{I}_1}\right) \quad (4.2)$$

$$M_2 = \arg\left(\frac{\vec{I}_2}{\vec{I}_0}\right) \quad (4.3)$$

Em que:

α é o operador rotacional que equivale a $1 \angle 120^\circ$;

$\vec{I}_0, \vec{I}_1, \vec{I}_2$ são os fasores de corrente em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

$\vec{I}_{a0}, \vec{I}_{a1}, \vec{I}_{a2}$ são os fasores de corrente em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, referidos à fase A;

$\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c$ são os fasores de corrente em as componentes de fase para as fases A, B e C, respectivamente;

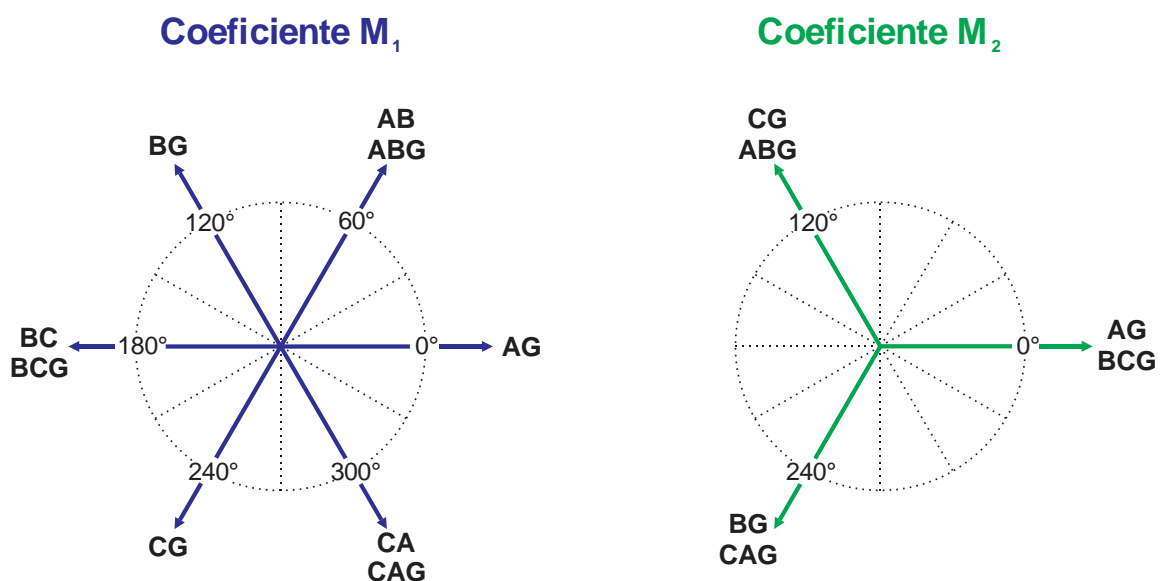
M_1 e M_2 são os coeficientes de seleção de fases.

Após a estimação de M_1 e M_2 , esses coeficientes são comparados com a Figura 4.1 para que se indique o tipo de falta ocorrida. Os tipos possíveis de seleção de fase são AG, BG, CG, AB, ABG, BC, BCG, CA e CAG, em que A, B e C correspondem às fases do sistema e G indica a participação da terra no defeito (do inglês *ground*). É interessante ressaltar que as relações mostradas na Figura 4.1 são válidas apenas para a sequência de fases ABC.

Nota-se, na Figura 4.1, que o coeficiente M_1 não permite que faltas do tipo bifásicas e bifásicas à terra sejam diferenciadas entre si. Já os valores obtidos através do coeficiente M_2 não permitem que a falta seja diretamente classificada, de forma que sempre há dois tipos diferentes para cada ângulo. Dessa forma, M_1 e M_2 devem trabalhar de forma conjunta para que a seleção de fases seja executada. Para faltas

monofásicas, deve-se, primeiramente, utilizar o coeficiente M_1 e confirmar o tipo da falta através de M_2 . Por exemplo, supondo que o valor de M_1 seja de 120° , isso indica que a falta é do tipo BG , e, caso o valor de M_2 seja de 240° , essa afirmativa é confirmada. Em faltas bifásicas, nota-se, na Figura 4.1, que o coeficiente M_2 não pode ser utilizado, uma vez que esse tipo de falta não apresenta componentes de sequência zero. Sendo assim, para que uma falta seja considerada bifásica, é necessário que o coeficiente M_1 indique 60° , 180° ou 300° simultaneamente a valores nulos (ou muito baixos) de sequência zero. Caso o valor da componente simétrica de sequência zero não seja nulo, a falta pode ser do tipo bifásica à terra, desde que o coeficiente M_2 indique 0° , 120° ou 240° . Por exemplo, caso M_1 seja igual a 180° , sabe-se que a falta é do tipo BCG ou BC . Assim, se a magnitude da componente de sequência zero for nula, a falta será automaticamente do tipo BC ; caso contrário, se M_2 for equivalente a 0° , a falta será BCG . As faltas trifásicas são as únicas não indicadas na Figura 4.1. Segundo Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000), para uma falta ser classificada como trifásica, é necessário que haja um grande crescimento do valor da componente de sequência positiva na ocorrência do defeito, aliado à inexistência das componentes de sequência zero e negativa.

Figura 4.1 – Comportamento dos Coeficientes M_1 e M_2



Fonte: O autor.

É sugerido pelos autores que sejam adotados valores de referência (*threshold*) mínimos para as componentes simétricas de sequência zero e negativa, de forma que a real presença dessas componentes não seja confundida com possíveis ruídos. Esse artifício é utilizado principalmente em relação a faltas trifásicas e bifásicas em que há a análise das magnitudes das sequências zero e negativa. O valor do *threshold* mínimo adotado por Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) não é apresentado em seu trabalho.

Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) afirmam que a remoção dos valores pré-falta⁷ de cada uma das componentes simétricas, antes do cálculo dos coeficientes de seleção, traz benefícios à performance da seleção de fases, principalmente sob condições de desequilíbrio de carga. Assim, podem-se estabelecer novos coeficientes para a seleção, $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$, que são calculados a partir da diferença entre as componentes simétricas durante a falta (t_{falta}) e seu valor durante o período de pré-falta ($t_{pré-falta}$). Os valores pré-falta são estabelecidos a partir do uso inerente de um detector de faltas, que permite indicar o instante em que a falta iniciou. Assim, os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ podem ser estimados através de (4.4) e (4.5).

$$M_{1\Delta} = \arg\left(\frac{\Delta \vec{I}_2}{\Delta \vec{I}_1}\right) = \arg\left(\frac{\vec{I}_2[t_{falta}] - \vec{I}_2[t_{pré-falta}]}{\vec{I}_1[t_{falta}] - \vec{I}_1[t_{pré-falta}]}\right) \quad (4.4)$$

$$M_{2\Delta} = \arg\left(\frac{\Delta \vec{I}_2}{\Delta \vec{I}_0}\right) = \arg\left(\frac{\vec{I}_2[t_{falta}] - \vec{I}_2[t_{pré-falta}]}{\vec{I}_0[t_{falta}] - \vec{I}_0[t_{pré-falta}]}\right) \quad (4.5)$$

Em que:

$\Delta \vec{I}_0, \Delta \vec{I}_1, \Delta \vec{I}_2$ são os fasores incrementais de corrente em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

$t_{pré-falta}$ é um instante de tempo durante o período pré-falta;

t_{falta} é um instante de tempo durante o período de falta;

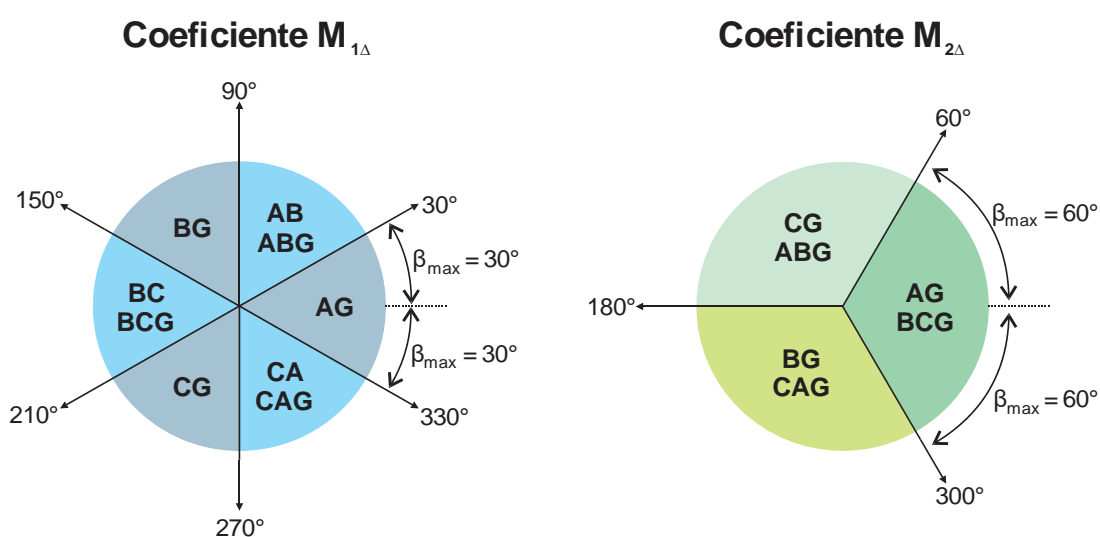
$M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ são os coeficientes de seleção de fases, calculados a partir de fasores incrementais.

Os autores também sugerem que os coeficientes utilizados na seleção de fases podem apresentar valores que diferem dos dados da Figura 4.1. Dessa forma, é

⁷ Período anterior ao início da falta.

estabelecido um limite máximo de variação (β_{max}) que cada coeficiente pode sofrer: para $M_{1\Delta}$, a variação máxima permitida é de 30° ; para $M_{2\Delta}$, o limite é de 60° . O valor de β_{max} deve ser aplicado em ambos os sentidos de rotação, tendo como ponto de partida os valores apresentados na Figura 4.1. Assim, são formadas regiões para a seleção de fases, que recebem o nome de sinos devido ao seu formato, conforme mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Sinos de Seleção de Fase



Fonte: O autor.

A partir do uso do limite de variação β_{max} , é possível que a seleção de fases seja realizada através de uma zona de cobertura referente a cada sino, não mais ficando dependente de apenas um valor. Assim, por exemplo, caso os valores dos coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ sejam, respectivamente, 15° e 40° , pode-se afirmar que a falta é do tipo monofásica AG, pois ambos os coeficientes estão dentro dos sinos referentes a esse tipo de defeito. Para aumentar a exatidão da resposta do método, pode-se reduzir o valor de β_{max} , porém isso acarreta uma maior possibilidade de má operação do selecionador, pois os coeficientes calculados podem não encaixar em nenhuma das áreas de seleção devido à diminuição da área de cobertura dos sinos.

Os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ também podem ser calculados em função das tensões (fase ou linha) do sistema, bastando, para isso, substituir os fasores de corrente em (4.4) e (4.5) pelos fasores de tensão. As relações apresentadas na Figura 4.1 permanecem válidas caso $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ sejam obtidos pelas componentes simétricas

de tensão, porém com diferentes valores de β_{max} . Para a seleção de fases, o método de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) utiliza, primeiramente, os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ aplicados às correntes. Caso essas informações não sejam suficientes para classificar a falta, são utilizados os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ aplicados às tensões. Persistindo a não seleção de fases, o evento é classificado como inconclusivo.

A metodologia de seleção de fases pela relação angular de componentes simétricas é bem difundida no ramo de classificação de faltas, sendo aplicada em diversos trabalhos, como, por exemplo, em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) e Huang, Luo e Cao (2014). Esse tipo de metodologia destaca-se, principalmente, pela simplicidade de sua implementação em sistemas reais, pois baseia-se na estimação de fasores e no uso de uma transformada para obtenção das componentes simétricas, funções comuns no que se refere aos relés utilizados na proteção de sistemas elétricos. Além disso, fatores como impedância de falta, nível de corrente ou, ainda, impedância dos condutores do sistema possuem pouca influência sobre o método (KASZTENNY; CAMPBELL; MAZEREEUW, 2000).

Apesar de se mostrar muito vantajosa e de simples implementação, a metodologia descrita em Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) é direcionada principalmente a linhas de transmissão e faltas de baixa impedância, sendo pouco conhecida sua validade em sistemas de distribuição de energia elétrica e perante faltas de alta impedância. É interessante avaliar o comportamento do método em relação a características clássicas do sistema de distribuição, como a presença de numerosas ramificações ao longo dos alimentadores, trocas constantes de tipos de condutores e presença de cargas desbalanceadas. Além disso, apesar de os autores indicarem que o método não sofre influência de fatores como a impedância de falta, é interessante submeter o método a FAI em diferentes configurações e com impedâncias de falta dinâmicas.

4.3 ABORDAGEM ANALÍTICA DO MÉTODO DE KASZTENNY, CAMPBELL E MAZEREEUW (2000) EM FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Os métodos de seleção de fase através da relação angular de componentes simétricas possuem como grande vantagem o fato de serem aplicáveis até mesmo a sistemas em que há uma diferença muito pequena entre os fasores do período de pré-falta e os fasores do período de falta (PRICE; EINARSSON, 2008). Esse é exatamente

o caso de faltas de alta impedância, em que as variações presentes na corrente da fase sob falta são pequenas em relação à corrente de carga do alimentador. Sendo assim, a seguir será apresentada a aplicação do método de seleção por relação angular de componentes simétricas em faltas de alta impedância, considerando a análise das correntes em cada fase do sistema a partir da subestação. As variações causadas nas tensões medidas na subestação não serão consideradas na análise, uma vez que estas variações são muito menores quando comparadas com as das correntes.

4.3.1 Faltas de Alta Impedância na Configuração FD e FDS-F

Conforme anteriormente abordado, faltas de alta impedância do tipo FD e FDS-F apresentam alterações na amplitude da corrente da fase sob falta muito superiores às alterações nas fases sãs. Dessa forma, considerando uma falta FD ou FDS-F na fase *B*, têm-se que $\Delta \vec{I}_b \gg \Delta \vec{I}_a$ e $\Delta \vec{I}_b \gg \Delta \vec{I}_c$. Logo, ao realizar a transformação para componentes simétricas, pode-se aproximar $\Delta \vec{I}_a = \Delta \vec{I}_c = 0$, conforme (4.6). O resultado obtido para as componentes simétricas garante os valores de 120° e 240° para os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$, respectivamente, mantendo a relação apresentada anteriormente na Figura 4.1. Para faltas FD e FDS-F nas fases *A* ou *C*, essa relação também é mantida, conforme demonstra a Tabela 4.1. Os valores incrementais $\Delta \vec{I}_a$, $\Delta \vec{I}_b$ e $\Delta \vec{I}_c$ são calculados pela diferença entre os fasores durante a falta (período após o estabelecimento do contato de alta impedância) e os fasores de pré-falta (período anterior ao estabelecimento do contato de alta impedância). Para faltas que envolvem o rompimento do condutor, o período de pré-falta considerado é aquele entre o rompimento e o início da falta (início do contato de alta impedância), indicados na Figura 2.6.

$$\begin{bmatrix} \Delta \vec{I}_0 \\ \Delta \vec{I}_1 \\ \Delta \vec{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \vec{I}_a \\ \Delta \vec{I}_b \\ \Delta \vec{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \vec{I}_b \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \vec{I}_b \\ \alpha \Delta \vec{I}_b \\ \alpha^2 \Delta \vec{I}_b \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

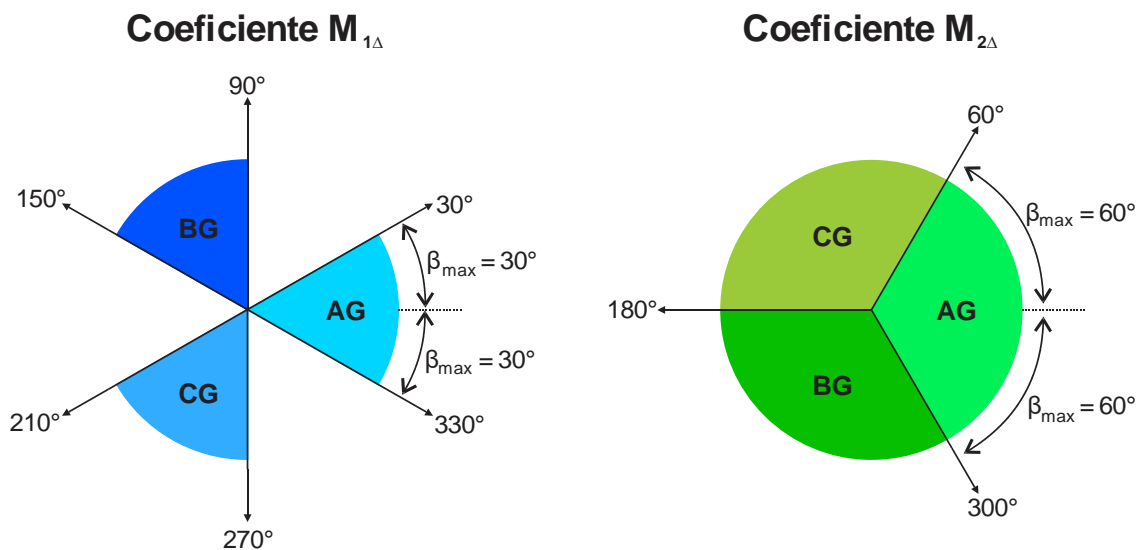
A partir dos dados da Tabela 4.1, é possível construir as regiões de seleção (sinos) através da aplicação dos valores de β_{max} a cada coeficiente de seleção, de acordo com a Figura 4.3. Os ângulos centrais de cada sino são os valores de $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ contidos na Tabela 4.1. É possível notar, através da Figura 4.3, que a relação angular entre componentes simétricas apresentada em Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) para faltas monofásicas mantém-se válida para faltas de alta impedância na configuração FD e FDS-F, não havendo alterações nos sinos de seleção em relação ao método original.

Tabela 4.1 – Valores dos Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para FAI na Configuração FD ou FDS-F

Fase sob Falta	Componentes de Fase			Componentes Simétricas			Coeficientes de Seleção	
	$\Delta \vec{I}_a$	$\Delta \vec{I}_b$	$\Delta \vec{I}_c$	$\Delta \vec{I}_0$	$\Delta \vec{I}_1$	$\Delta \vec{I}_2$	$M_{1\Delta}$	$M_{2\Delta}$
A	$\Delta \vec{I}_a$	$\cong 0$	$\cong 0$	$\Delta \vec{I}_a$	$\Delta \vec{I}_a$	$\Delta \vec{I}_a$	0°	0°
B	$\cong 0$	$\Delta \vec{I}_b$	$\cong 0$	$\Delta \vec{I}_b$	$\alpha \Delta \vec{I}_b$	$\alpha^2 \Delta \vec{I}_b$	120°	240°
C	$\cong 0$	$\cong 0$	$\Delta \vec{I}_c$	$\Delta \vec{I}_c$	$\alpha^2 \Delta \vec{I}_c$	$\alpha \Delta \vec{I}_c$	240°	120°

Fonte: O autor.

Figura 4.3 – Sinos de Seleção de Fases para FAI nas Configurações FD e FDS-F



Fonte: O autor.

4.3.2 Faltas de Alta Impedância na Configuração FDS-FC

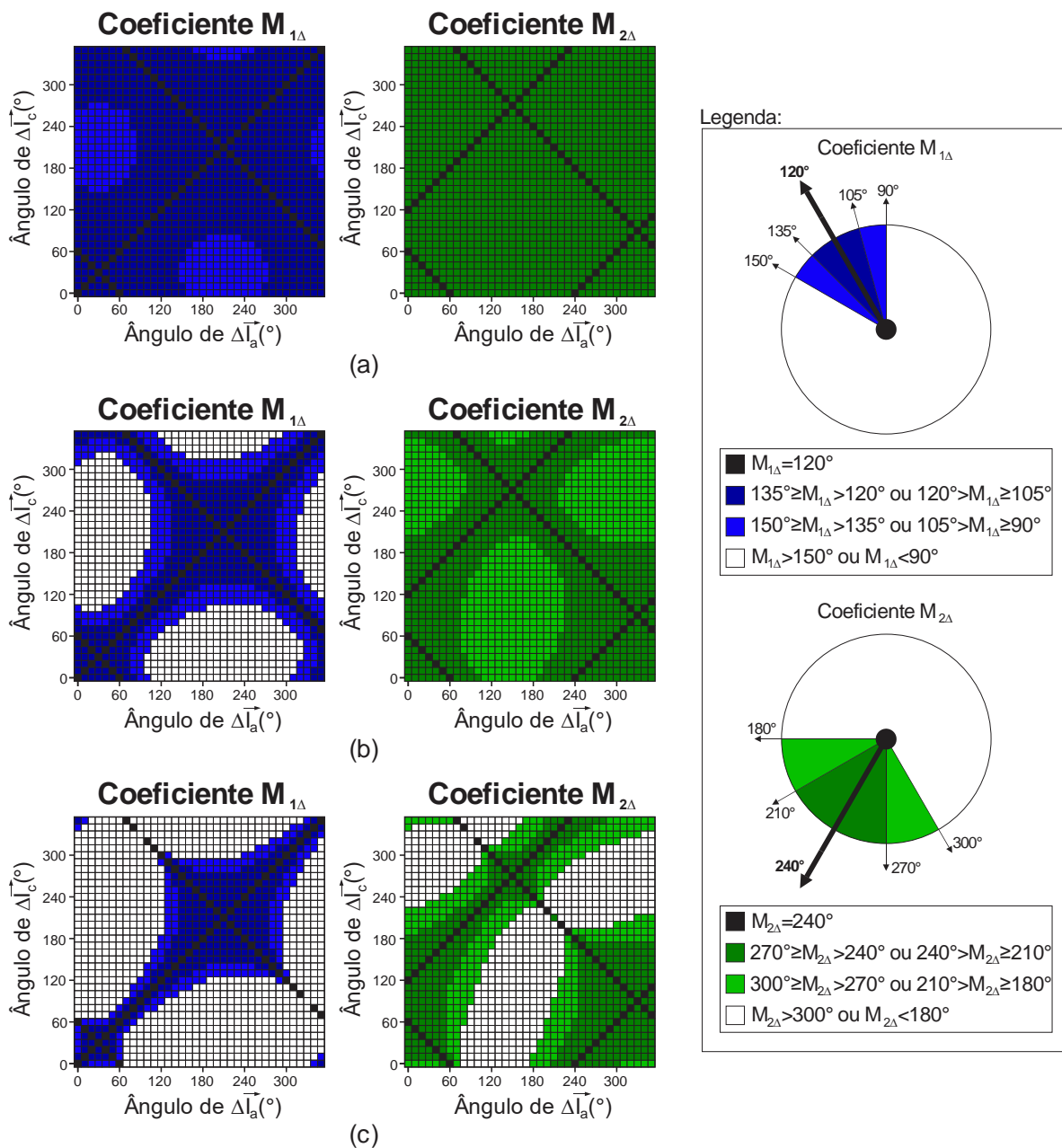
Faltas na configuração FDS-FC também possuem um comportamento muito semelhante aos tipos FD e FDS-F, pois as alterações provocadas na corrente da fase sob falta são maiores que nas fases sãs. Dessa forma, se a falta ocorrer na fase *B*, por exemplo, têm-se $\Delta \vec{I}_b > \Delta \vec{I}_a$ e $\Delta \vec{I}_b > \Delta \vec{I}_c$, porém não é possível aproximar $\Delta \vec{I}_a$ e $\Delta \vec{I}_c$ como nulos, devido à ação da impedância de falta do lado da carga, que provoca alterações nas correntes das fases sãs.

É necessário então avaliar a influência das alterações nas fases sãs sobre a resposta dos coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$. Nesse sentido, a Figura 4.4 exemplifica o comportamento dos coeficientes de seleção, considerando $\Delta \vec{I}_b = 1 \angle 30^\circ$ e $|\Delta \vec{I}_b| > |\Delta \vec{I}_a| = |\Delta \vec{I}_c|$, valores que imitam variações de corrente oriundas de uma FAI na configuração FDS-FC ocorrendo na fase *B*. Ao total, são apresentados três diferentes cenários: $|\Delta \vec{I}_a| = |\Delta \vec{I}_c| = 0,1$, $|\Delta \vec{I}_a| = |\Delta \vec{I}_c| = 0,3$ e $|\Delta \vec{I}_a| = |\Delta \vec{I}_c| = 0,5$. Dentro de cada cenário, os valores de $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ variam de acordo com o ângulo dos fasores das fases sãs (fase *A* no eixo *x* e fase *C* no eixo *y*). A mudança dos ângulos nos eixos *x* e *y* dos gráficos ocorre em intervalos de 10° . Cada gráfico apresenta cores de acordo a posição dos coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ em relação aos seus respectivos sinus de seleção *BG*, anteriormente representados na Figura 4.3. A cor branca indica que o coeficiente está fora do sino de seleção *BG*. Já a cor preta indica que o coeficiente de seleção encontra-se exatamente no ângulo central do sino de seleção (120° para $M_{1\Delta}$ e 240° para $M_{2\Delta}$). Além disso, cada sino está subdividido em duas regiões: uma de tonalidade escura, com localização mais central ao sino, e uma região de tonalidade mais clara, mais afastada do ângulo central.

Nota-se, na Figura 4.4a, para $|\Delta \vec{I}_a| = |\Delta \vec{I}_c| = 0,1$, que os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ permanecem dentro dos sinus de seleção para qualquer combinação angular entre $\Delta \vec{I}_a$ e $\Delta \vec{I}_c$. Isso ocorre, pois é possível aproximar que $\Delta \vec{I}_b \gg \Delta \vec{I}_a$ e $\Delta \vec{I}_b \gg \Delta \vec{I}_c$, semelhantemente às configurações FD e FDS-F, validando os dados da Tabela 4.1 também para faltas na configuração FDS-FC. Porém, à medida que se aumenta a influência das fases sãs com maiores valores de $|\Delta \vec{I}_a|$ e $|\Delta \vec{I}_c|$, percebe-se que os coeficientes de seleção tendem a sair das regiões de seleção em alguns casos,

principalmente no que se refere ao coeficiente $M_{1\Delta}$, que, com $|\Delta\vec{I}_a| = |\Delta\vec{I}_c| = 0,3$ (Figura 4.4b), já apresentou valores fora do seno BG (região na cor branca). Na Figura 4.4c, com $|\Delta\vec{I}_a| = |\Delta\vec{I}_c| = 0,5$, a influência das fases sãs é ainda mais severa, e ambos os coeficientes de seleção apresentam valores fora do seno de seleção.

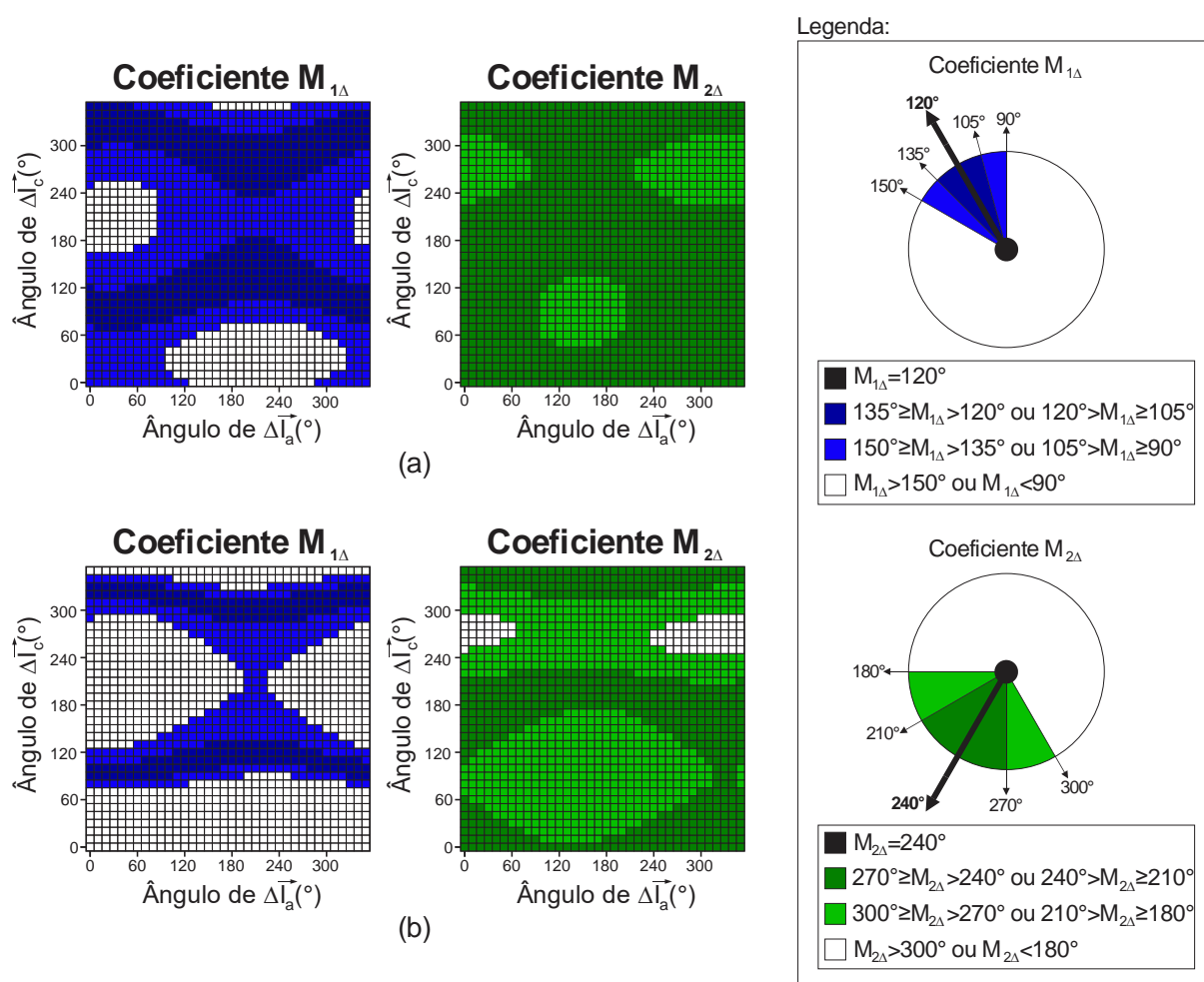
Figura 4.4 – Comportamento Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para $\Delta\vec{I}_b = 1 \angle 30^\circ$ e $|\Delta\vec{I}_a| = |\Delta\vec{I}_c|$:
 (a) $|\Delta\vec{I}_a| = |\Delta\vec{I}_c| = 0,1$; (b) $|\Delta\vec{I}_a| = |\Delta\vec{I}_c| = 0,3$; (c) $|\Delta\vec{I}_a| = |\Delta\vec{I}_c| = 0,5$



Fonte: O autor.

Devido ao desequilíbrio de carga e à presença de ramais monofásicos e bifásicos em sistemas de distribuição, nem sempre as variações nos módulos das fases são ocorrerão de forma igual em uma FAI na configuração FDS-FC. A Figura 4.5 avalia o mesmo cenário da Figura 4.4, porém considerando $|\Delta\vec{I}_a| \neq |\Delta\vec{I}_c|$. É possível notar que, assim como na Figura 4.4, para algumas combinações angulares entre $\Delta\vec{I}_a$ e $\Delta\vec{I}_c$, os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ também apresentam valores fora dos sinos BG, o que implica na seleção de fases de forma errônea. O coeficiente $M_{1\Delta}$ é novamente o mais afetado pela variação dos fasores das fases são.

Figura 4.5 – Comportamento Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para $\Delta\vec{I}_b = 1\angle 30^\circ$ e $|\Delta\vec{I}_a| \neq |\Delta\vec{I}_c|$: (a) $|\Delta\vec{I}_a| = 0,3$ e $|\Delta\vec{I}_c| = 0,1$; (b) $|\Delta\vec{I}_a| = 0,5$ e $|\Delta\vec{I}_c| = 0,1$



Fonte: O autor.

Assim, de uma forma geral, pode-se concluir que o diagrama da Figura 4.3 também pode ser utilizado para a configuração FDS-FC desde que as variações de corrente nas fases sãs sejam suficientemente menores que a variação na fase sob falta. Porém ainda é necessário verificar a possível ocorrência de cenários de incorreta seleção de fases, como apresentado em alguns casos da Figura 4.4 e da Figura 4.5 (com $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ fora dos sinus de seleção), em sistemas tanto em equilíbrio quanto em desequilíbrio de carga.

4.3.3 Falhas de Alta Impedância na Configuração FDS-C

Diferentemente das outras configurações de FAI, em faltas do tipo FDS-C, as maiores alterações na amplitude das correntes são apresentadas nas fases sãs, pois, uma vez que o contato de alta impedância é realizado do lado da carga, são apenas as fases sãs que permanecem conectadas à impedância de falta através das ligações remanescentes entre as três fases, em transformadores trifásicos a jusante do ponto de falta. Portanto, considerando um sistema equilibrado, em que uma FAI do tipo FDS-C ocorre na fase B , pode-se considerar que $\Delta \vec{I}_a \gg \Delta \vec{I}_b$ e $\Delta \vec{I}_c \gg \Delta \vec{I}_b$, sendo, aproximadamente, $\Delta \vec{I}_a = \Delta \vec{I}_c$ e $\Delta \vec{I}_b = 0$. A partir dessas aproximações, é possível obter os valores de $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ através das componentes simétricas calculadas em (4.7).

$$\begin{bmatrix} \Delta \vec{I}_0 \\ \Delta \vec{I}_1 \\ \Delta \vec{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \vec{I}_a \\ \Delta \vec{I}_b \\ \Delta \vec{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \vec{I}_c \\ 0 \\ \Delta \vec{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2\Delta \vec{I}_c \\ (1+\alpha^2)\Delta \vec{I}_c \\ (1+\alpha)\Delta \vec{I}_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

O mesmo procedimento aplicado em (4.7) também pode ser utilizado para faltas nas fases A e C , basta realizar as alterações cabíveis em relação aos valores considerados para as componentes de fase. Os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ resultantes de faltas do tipo FDS-C nas fases A , B e C são apresentados na Tabela 4.2, a partir dos quais é possível aplicar os valores β_{max} e construir os sinus de seleção, conforme mostra a Figura 4.6. Nota-se, na Figura 4.6, que o coeficiente $M_{1\Delta}$ segue o mesmo

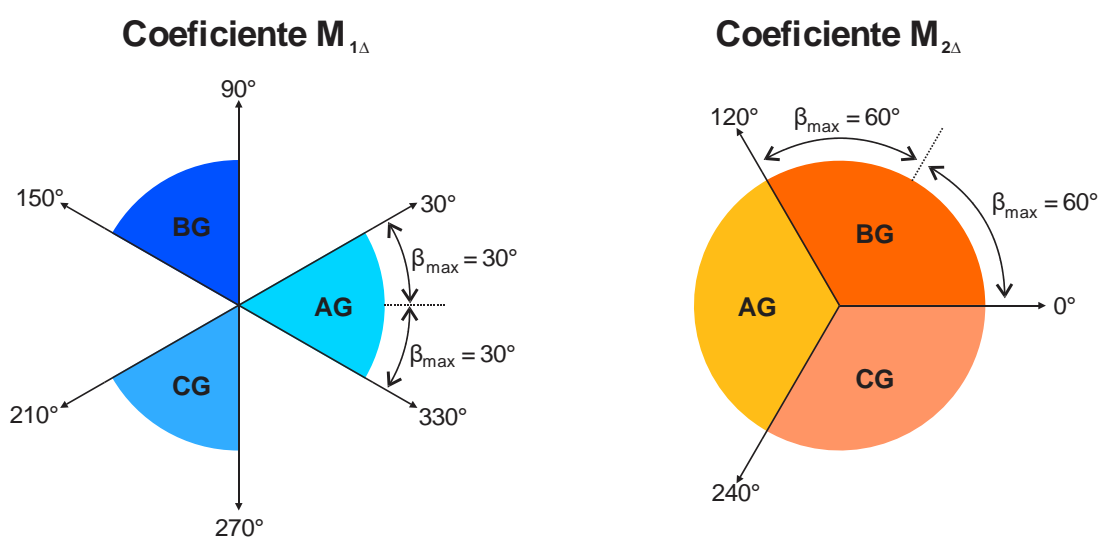
padrão de sinus de seleção apresentado para as outras configurações de FAI. Em contrapartida, $M_{2\Delta}$ difere desse padrão.

Tabela 4.2 – Valores dos Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para FAI na Configuração FDS-C

Fase sob Falta	Componentes de Fase			Componentes Simétricas			Coeficientes de Seleção	
	$\vec{\Delta I}_a$	$\vec{\Delta I}_b$	$\vec{\Delta I}_c$	$\vec{\Delta I}_0$	$\vec{\Delta I}_1$	$\vec{\Delta I}_2$	$M_{1\Delta}$	$M_{2\Delta}$
A	$\cong 0$	$\vec{\Delta I}_b$	$\cong \vec{\Delta I}_b$	$2\vec{\Delta I}_b$	$-\vec{\Delta I}_b$	$-\vec{\Delta I}_b$	0°	180°
B	$\cong \vec{\Delta I}_c$	$\cong 0$	$\vec{\Delta I}_c$	$2\vec{\Delta I}_c$	$(1+\alpha^2)\vec{\Delta I}_c$	$(1+\alpha)\vec{\Delta I}_c$	120°	60°
C	$\vec{\Delta I}_a$	$\cong \vec{\Delta I}_a$	$\cong 0$	$2\vec{\Delta I}_a$	$(1+\alpha)\vec{\Delta I}_a$	$(1+\alpha^2)\vec{\Delta I}_a$	240°	300°

Fonte: O autor.

Figura 4.6 – Sinos de Seleção de Fases para FAI na Configuração FDS-C

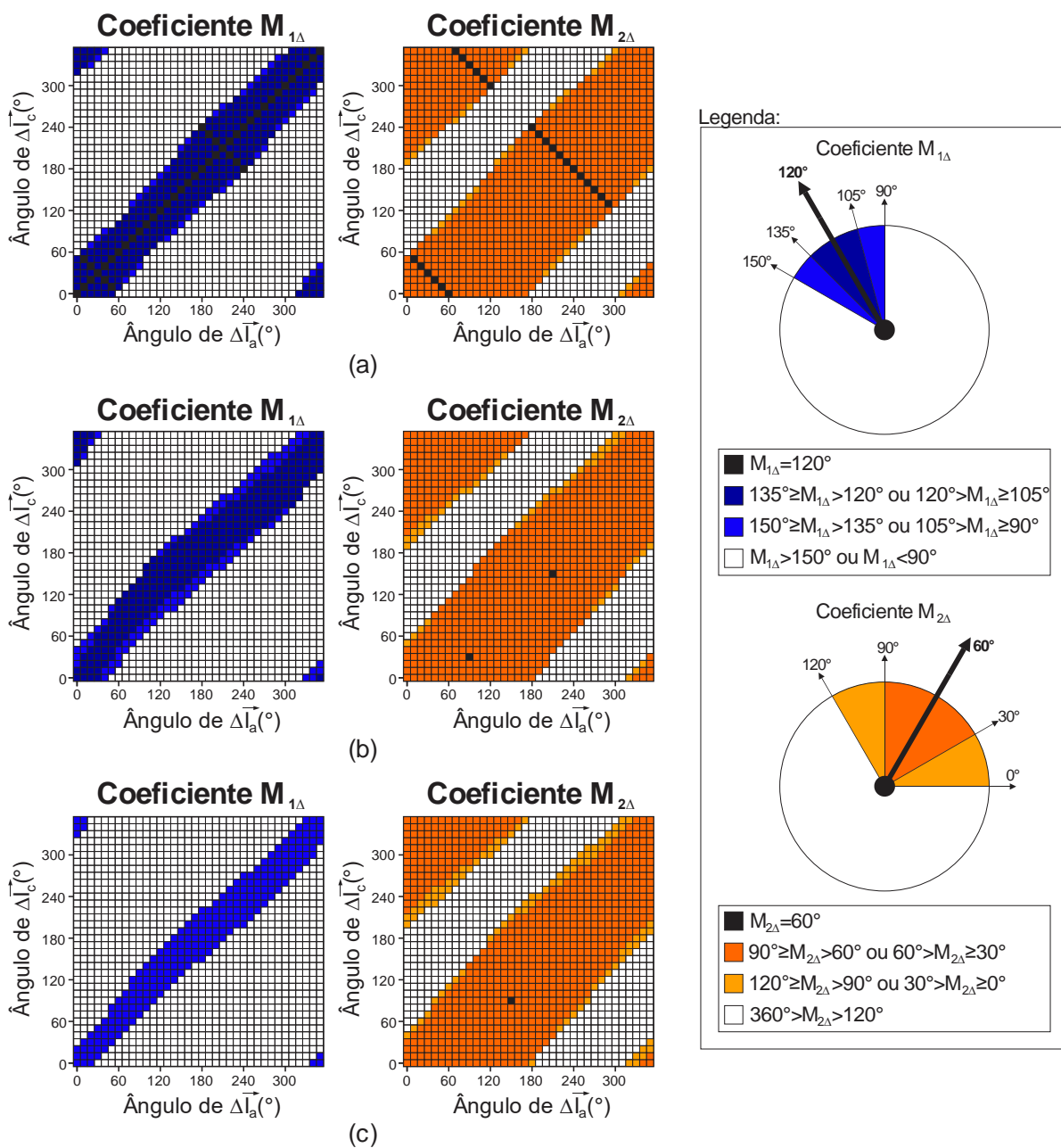


Fonte: O autor.

As faltas na configuração FDS-C, por apresentarem alterações tão sutis nas correntes em cada fase do alimentador, são as mais susceptíveis a sofrerem influência do desequilíbrio de carga. A Figura 4.7 apresenta o comportamento dos coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ considerando uma suposta FAI na fase B na configuração FDS-C. Escolheu-se $\vec{\Delta I}_b = 0,1\angle 30^\circ$ de modo a avaliar a relação entre módulo e ângulo das fases são A

e C. A análise da Figura 4.7 é semelhante à realizada na Figura 4.4 e na Figura 4.5, em que os sinus de seleção são subdivididos em diferentes regiões, sendo possível avaliar situações em que os coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ se encontram fora de seus respectivos sinus BG (regiões na cor branca).

Figura 4.7 – Comportamento Coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ para $\Delta\vec{I}_b = 0,1 \angle 30^\circ$, $|\Delta\vec{I}_a| \gg |\Delta\vec{I}_b|$ e $|\Delta\vec{I}_c| \gg |\Delta\vec{I}_b|$: (a) $|\Delta\vec{I}_a| = |\Delta\vec{I}_c| = 1$; (b) $|\Delta\vec{I}_a| = 1$ e $|\Delta\vec{I}_c| = 0,9$; (c) $|\Delta\vec{I}_a| = 1$ e $|\Delta\vec{I}_c| = 0,8$



Fonte: O autor.

Para $|\Delta\vec{I}_a|=|\Delta\vec{I}_c|=1$ (Figura 4.7a), é possível notar que os coeficientes de seleção, principalmente $M_{1\Delta}$, concentram-se na diagonal do gráfico, significando que, para faltas FDS-C, é indispensável que os fasores $\Delta\vec{I}_a$ e $\Delta\vec{I}_c$ possuam ângulos o mais próximo da igualdade possível. Obviamente, devido à ação do desequilíbrio de carga, esse fato pode não ser possível, o que poderia implicar em respostas inconclusivas (fora dos sinos). A Figura 4.7 também demonstra duas situações, considerando $|\Delta\vec{I}_a|\neq|\Delta\vec{I}_c|$ (Figura 4.7b e Figura 4.7c), em que o coeficiente $M_{1\Delta}$ tende a assumir valores cada vez mais afastados do ângulo central do sino à medida que a diferença entre $|\Delta\vec{I}_a|$ e $|\Delta\vec{I}_c|$ aumenta. O coeficiente $M_{2\Delta}$, por sua vez, apresenta uma resposta mais robusta, mantendo praticamente o mesmo comportamento perante as variações de módulo e ângulo às quais foi submetido.

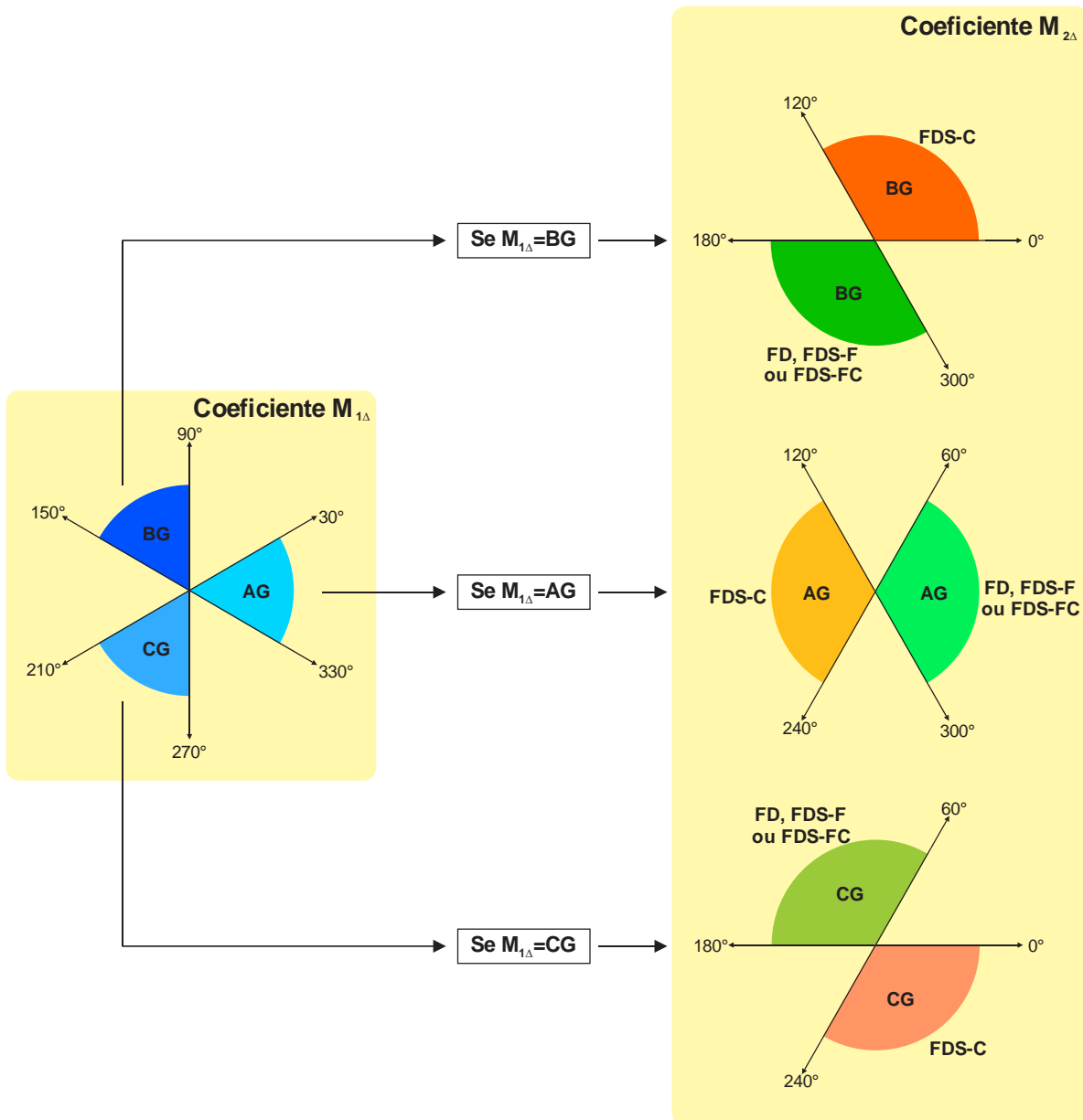
4.4 MÉTODOS PROPOSTOS

4.4.1 Conceito Geral

De forma geral, pode-se dizer que é possível aplicar o método de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) para FAI em diferentes configurações sem a necessidade de grandes alterações. É preciso apenas realizar adaptações em relação aos sinos de seleção utilizados para o coeficiente $M_{2\Delta}$ em faltas na configuração FDS-C. Sendo assim, a partir das relações angulares de componentes simétricas para as quatro diferentes possibilidades de configuração de FAI, pode-se unir as características apresentadas na Figura 4.3 e na Figura 4.6 em um único esquema de seleção, proposto na Figura 4.8. Esse esquema permanece baseado no cálculo dos coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$. Para $M_{1\Delta}$, os sinos de seleção continuam os mesmos utilizados em Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) para faltas monofásicas. Já para $M_{2\Delta}$, há a possibilidade do uso de três diferentes gráficos, cuja escolha está condicionada às respostas obtidas em $M_{1\Delta}$. Então, primeiramente, é necessário estimar $M_{1\Delta}$ e verificar se sua resposta é conclusiva (se está dentro de algum dos sinos de seleção). Em caso afirmativo, calcula-se $M_{2\Delta}$ e compara-se seu valor com o gráfico escolhido a partir de $M_{1\Delta}$. O coeficiente $M_{2\Delta}$ permite, além de indicar a fase sob falta, diferenciar a

FAI do tipo FDS-C do restante das configurações possíveis. Caso $M_{1\Delta}$ ou $M_{2\Delta}$ estejam fora dos sinos de seleção, a falta é tida como inconclusiva.

Figura 4.8 – Esquema Proposto para a Seleção de Fases em FAI



Fonte: O autor.

Contudo, como o esquema da Figura 4.8 é muito semelhante ao método de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000), ele também pode ser utilizado em faltas de baixa impedância monofásicas. Dessa forma, optou-se por adicionar um critério que consiga distinguir entre faltas de alta e de baixa impedância, uma vez que o

esquema da Figura 4.8 será utilizado tanto no algoritmo de seleção de fases quanto no algoritmo de detecção de FAI propostos neste trabalho. O critério escolhido está relacionado ao uso de fasores de corrente de terceira harmônica para o cálculo de outros dois coeficientes de seleção. Assim, ao todo são calculados quatro coeficientes de seleção: $M_{1\Delta}^{1h}$ e $M_{2\Delta}^{1h}$, em relação à frequência fundamental (60Hz), e $M_{1\Delta}^{3h}$ e $M_{2\Delta}^{3h}$, em relação à terceira harmônica (180Hz). Os coeficientes $M_{1\Delta}^{1h}$, $M_{2\Delta}^{1h}$, $M_{1\Delta}^{3h}$ e $M_{2\Delta}^{3h}$ são obtidos por (4.8), (4.9), (4.10) e (4.11), respectivamente. A escolha de utilizar os coeficientes de seleção calculados através de fasores de terceira harmônica foi realizada, pois a presença de conteúdo harmônico nessa faixa de frequência é um dos principais fatores que caracterizam uma FAI.

$$M_{1\Delta}^{1h} = \arg\left(\frac{\Delta \overline{I_2^{1h}}}{\Delta \overline{I_1^{1h}}}\right) = \arg\left(\frac{\overline{I_2^{1h}}[n_{falta}] - \overline{I_2^{1h}}[n_{pré-falta}]}{\overline{I_1^{1h}}[n_{falta}] - \overline{I_1^{1h}}[n_{pré-falta}]}\right) \quad (4.8)$$

$$M_{2\Delta}^{1h} = \arg\left(\frac{\Delta \overline{I_2^{1h}}}{\Delta \overline{I_0^{1h}}}\right) = \arg\left(\frac{\overline{I_2^{1h}}[n_{falta}] - \overline{I_2^{1h}}[n_{pré-falta}]}{\overline{I_0^{1h}}[n_{falta}] - \overline{I_0^{1h}}[n_{pré-falta}]}\right) \quad (4.9)$$

$$M_{1\Delta}^{3h} = \arg\left(\frac{\Delta \overline{I_2^{3h}}}{\Delta \overline{I_1^{3h}}}\right) = \arg\left(\frac{\overline{I_2^{3h}}[n_{falta}] - \overline{I_2^{3h}}[n_{pré-falta}]}{\overline{I_1^{3h}}[n_{falta}] - \overline{I_1^{3h}}[n_{pré-falta}]}\right) \quad (4.10)$$

$$M_{2\Delta}^{3h} = \arg\left(\frac{\Delta \overline{I_2^{3h}}}{\Delta \overline{I_0^{3h}}}\right) = \arg\left(\frac{\overline{I_2^{3h}}[n_{falta}] - \overline{I_2^{3h}}[n_{pré-falta}]}{\overline{I_0^{3h}}[n_{falta}] - \overline{I_0^{3h}}[n_{pré-falta}]}\right) \quad (4.11)$$

Em que:

$\overline{I_{0,1,2}^{1h}}$ e $\overline{I_{0,1,2}^{3h}}$ são os fasores de corrente em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa para a frequência fundamental e terceira harmônica, respectivamente;

$\Delta \overline{I_{0,1,2}^{1h}}$ e $\Delta \overline{I_{0,1,2}^{3h}}$ são os fasores incrementais de corrente em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa para a frequência fundamental e terceira harmônica, respectivamente;

n_{falta} amostra relativa ao período de falta (equivalente a t_{falta});

$n_{pré-falta}$ amostra relativa ao período de pré-falta (equivalente a $t_{pré-falta}$).

O esquema da Figura 4.8 permanece válido tanto para coeficientes de seleção na frequência fundamental quanto para os coeficientes de terceira harmônica, pois toda a abordagem desenvolvida na seção 4.3 é válida para ambas as faixas de frequência. Dessa forma, aplicando os coeficientes $M_{1\Delta}^{1h}$, $M_{2\Delta}^{1h}$, $M_{1\Delta}^{3h}$ e $M_{2\Delta}^{3h}$ ao esquema da Figura 4.8, obtêm-se duas respostas: $tipo_{1h}$ (em relação aos coeficientes da frequência fundamental) e $tipo_{3h}$ (em relação aos coeficientes de terceira harmônica). Os valores possíveis para as variáveis $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$ estão dispostos no Quadro 4.1. Dessa maneira, é necessário que $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$ apresentem a mesma resposta para que a seleção de fases seja indicada corretamente, fato que aumenta a confiabilidade da resposta final do método. Em caso de divergência entre as respostas de $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$, a resposta final é tida como inconclusiva.

Quadro 4.1 – Respostas das Variáveis $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$

Valor do Coeficiente $M_{1\Delta}$ ($M_{1\Delta}^{1h}$ ou $M_{1\Delta}^{3h}$)	Valor do Coeficiente $M_{2\Delta}$ ($M_{2\Delta}^{1h}$ ou $M_{2\Delta}^{3h}$)	Resposta da Seleção de Fases ($tipo_{1h}$ ou $tipo_{3h}$)
$-30^\circ \leq M_{1\Delta} \leq 30^\circ$	$-60^\circ \leq M_{2\Delta} \leq 60^\circ$	AG – FD, FDS-F ou FDS-FC
	$120^\circ \leq M_{2\Delta} \leq 240^\circ$	AG – FDS-C
	Outro	Inconclusivo
$90^\circ \leq M_{1\Delta} \leq 150^\circ$	$0^\circ \leq M_{2\Delta} \leq 120^\circ$	BG – FD, FDS-F ou FDS-FC
	$180^\circ \leq M_{2\Delta} \leq 300^\circ$	BG – FDS-C
	Outro	Inconclusivo
$210^\circ \leq M_{1\Delta} \leq 270^\circ$	$60^\circ \leq M_{2\Delta} \leq 180^\circ$	CG – FD, FDS-F ou FDS-FC
	$240^\circ \leq M_{1\Delta} \leq 360^\circ$	CG – FDS-C
	Outro	Inconclusivo
Outro	-	Inconclusivo

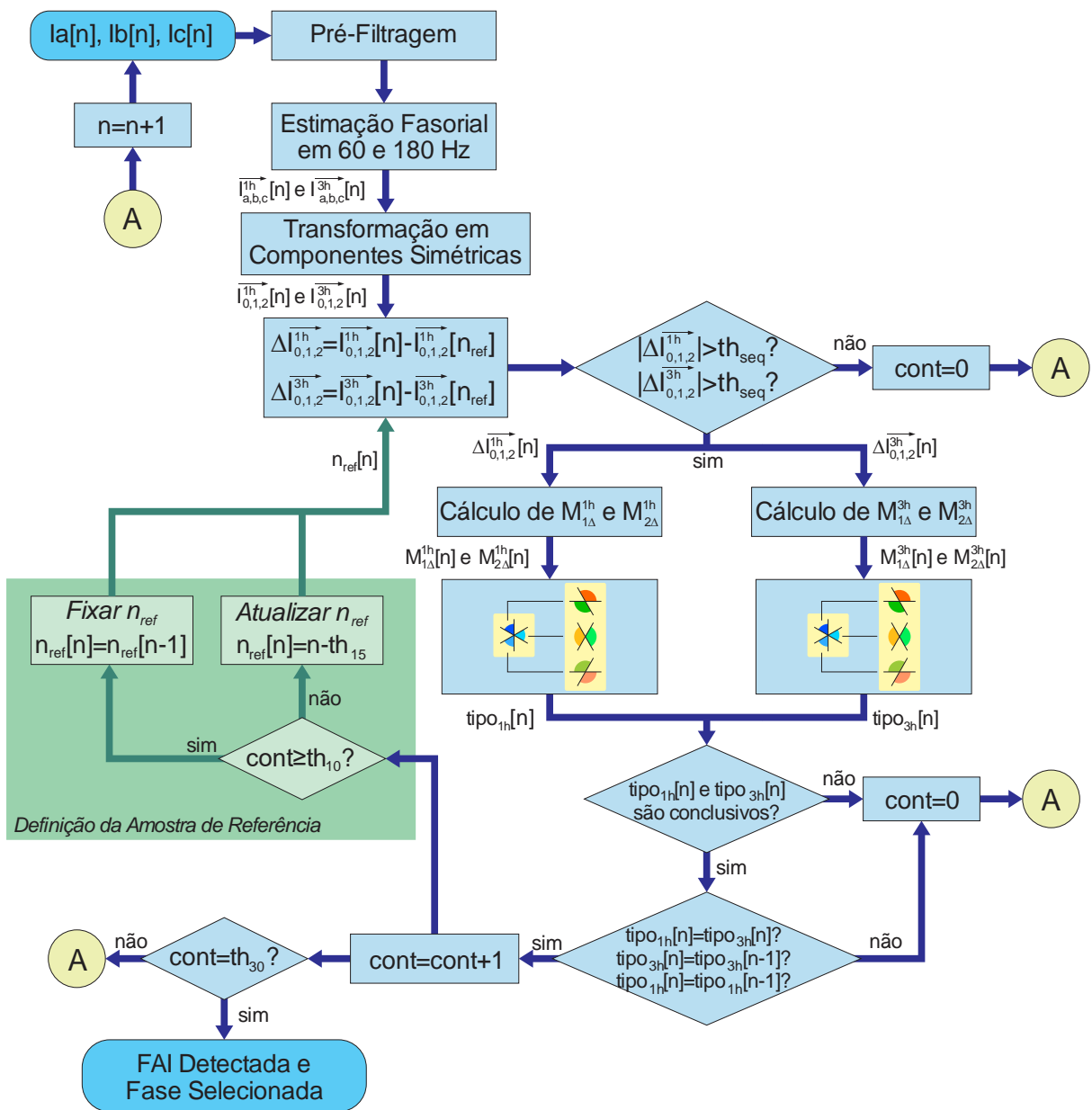
Fonte: O autor.

4.4.2 Algoritmo de Detecção de FAI

O algoritmo detector de faltas de alta impedância proposto neste trabalho tem o objetivo de indicar a presença de uma FAI no sistema e realizar a seleção de fases ao mesmo tempo. A Figura 4.9 apresenta o fluxograma de implementação do algoritmo de detecção de FAI.

O funcionamento do detector é baseado na verificação contínua da resposta de seleção de fase, e, caso esta permaneça constante durante um período equivalente a 30 ciclos (0,5s em 60Hz), a FAI é detectada. Para isso, o método faz o uso conjunto de $M_{1\Delta}^{1h}$, $M_{2\Delta}^{1h}$, $M_{1\Delta}^{3h}$ e $M_{2\Delta}^{3h}$, sendo caracterizado como uma metodologia no domínio da frequência e com tomada de decisão a partir de valores de referência e tempo de espera. Todos os valores de referência e tempos de espera utilizados neste método foram escolhidos empiricamente.

Figura 4.9 – Fluxograma do Algoritmo Detector de FAI



Fonte: O autor.

Os dados de entrada do detector são os sinais instantâneos de corrente, medidos a partir da subestação, em cada fase do alimentador, utilizando uma taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo. Primeiramente, os sinais de corrente são tratados por uma etapa de pré-filtragem, na qual é aplicado um filtro *anti-aliasing*. Optou-se por um filtro passa-baixa Butterworth de segunda ordem, pois este apresenta baixa distorção de fase em comparação a outros tipos de filtros. Ainda, o filtro de segunda ordem proporciona um menor tempo de convergência, ou seja, a diferença de fase entre a entrada e a saída do filtro é menor quando comparada com ordens superiores (SILVA, C., 2014). A frequência de corte utilizada foi de 480Hz.

Após a etapa de pré-filtragem, estimam-se os fasores das correntes na frequência fundamental e terceira harmônica. Existem diversos métodos para que a estimação de um fasor seja realizada, porém as metodologias com base na TDF são as mais utilizadas em relés de proteção (SILVA, C., 2014). Sendo assim, foi escolhido o Filtro de Fourier de Ciclo Completo (FFCC). Para o processo de obtenção dos fasores a partir do FFCC, utilizam-se (4.12) e (4.13), em que cada sinal instantâneo de corrente (nesse caso exemplificado para a corrente I_a) é relacionado com as funções cosseno e seno, respectivamente. A partir de $I_{a\cos}^m$ e $I_{a\sen}^m$, o módulo e a fase do fasor que representa o sinal I_a podem ser calculados, respectivamente, por (4.14) e (4.15). Ao final da utilização do FFCC, são obtidos os fasores $\overline{I_{a,b,c}^{1h}}$ para a frequência fundamental e $\overline{I_{a,b,c}^{3h}}$ para a terceira harmônica.

$$I_{a\cos}^m[n] = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_a[n-k] \cdot \cos\left(n \frac{2\pi}{N} m\right) \quad (4.12)$$

$$I_{a\sen}^m[n] = -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_a[n-k] \cdot \sen\left(n \frac{2\pi}{N} m\right) \quad (4.13)$$

$$|\overline{I_a^m}[n]| = \sqrt{(I_{a\cos}^m[n])^2 + (I_{a\sen}^m[n])^2} \quad (4.14)$$

$$\angle \overline{I_a^m}[n] = \arctan\left(\frac{I_{a\sen}^m[n]}{I_{a\cos}^m[n]}\right) \quad (4.15)$$

Em que:

$I_{a\cos}^m$ é o sinal filtrado a partir de amostras de um ciclo da função cosseno;

$I_{a\sen}^m$ é o sinal filtrado a partir de amostras de um ciclo da função seno;

N é o número de amostras por ciclo do sinal;

n é a n -ésima amostra do sinal;

m é a m -ésima harmônica do sinal ($m = 1$ para a frequência fundamental e $m = 3$ para a terceira harmônica).

Seguindo o fluxograma da Figura 4.9, os fasores $\overrightarrow{I_{a,b,c}^{1h}}$ e $\overrightarrow{I_{a,b,c}^{3h}}$ são transformados em componentes simétricas a partir do uso de (4.1). Diante disso, obtêm-se os fasores $\overrightarrow{I_{0,1,2}^{1h}}$ e $\overrightarrow{I_{0,1,2}^{3h}}$, que são enviados à etapa de determinação dos fasores incrementais.

No método original de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000), é necessário o instante pré-falta para que se determinem os fasores incrementais. Porém o algoritmo da Figura 4.9 consiste em um detector de FAI, logo o instante pré-falta não está disponível. Dessa maneira, foi necessário criar uma amostra de referência n_{ref} para a determinação dos fasores incrementais das componentes simétricas. O valor da amostra de referência possui atualização constante, a cada amostra, em que $n_{ref}[n] = n - th_{15}$. O valor de th_{15} é equivalente a 15 ciclos (0,25s em 60Hz), ou seja, os fasores incrementais são calculados em relação à amostra que está localizada a 15 ciclos antes da amostra atual n . Ao final dessa etapa, são obtidos os fasores incrementais $\Delta \overrightarrow{I_{0,1,2}^{1h}}$ e $\Delta \overrightarrow{I_{0,1,2}^{3h}}$.

Posteriormente, é realizada a comparação do módulo dos fasores incrementais com um valor de referência th_{seq} . Esse é um procedimento recomendado em Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000) e tem por objetivo evitar que a real presença de variação nos valores das componentes simétricas seja confundida com variações provocadas pela presença de ruídos no sistema, por exemplo. Porém, uma vez que este trabalho não irá averiguar fatores como presença de ruído nos sinais de corrente, estabeleceu-se um valor de 0,1A (valor referente ao enrolamento primário do TC) para th_{seq} , de modo que até mesmo variações muito pequenas sejam perceptíveis ao método. O valor de 0,1A é válido tanto para os fasores incrementais de componentes simétricas na frequência fundamental quanto na terceira harmônica.

Caso os critérios de th_{seq} sejam satisfeitos, utilizam-se (4.8), (4.9), (4.10) e (4.11) para estimar os coeficientes $M_{1\Delta}^{1h}$, $M_{2\Delta}^{1h}$, $M_{1\Delta}^{3h}$ e $M_{2\Delta}^{3h}$, respectivamente. Os coeficientes de seleção são então comparados com o esquema de seleção de fases proposto na Figura 4.8, obtendo as respostas $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$. Essas variáveis são

analisadas através de dois critérios. O primeiro deles verifica se $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$ possuem respostas conclusivas, de acordo com o Quadro 4.1. O segundo critério considera a necessidade de que $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$ sejam equivalentes e permaneçam inalteráveis em relação às suas respectivas amostras anteriores. O fato de $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$ serem iguais mostra que ambas as variáveis estão indicando a mesma fase sob defeito, originada pelo mesmo tipo de configuração de FAI, aumentando, assim, a confiabilidade da resposta final em relação à possível utilização de somente uma variável $tipo$.

Caso os dois critérios relacionados às variáveis $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$ sejam satisfeitos, o contador $cont$ é incrementado. Quando o valor de $cont$ atinge um período de tempo igual ou superior a th_{10} (= 10 ciclos), realiza-se a fixação da amostra de referência n_{ref} . A partir de então, caso as próximas respostas de $tipo_{1h}$ e $tipo_{3h}$ permaneçam iguais e inalteráveis por mais 20 ciclos ($cont = th_{30} = 30$ ciclos = $th_{10} + 20$ ciclos), a falta de alta impedância é detectada, e a seleção de fases é apresentada como sendo correspondente ao $tipo_{1h}$ (ou $tipo_{3h}$, uma vez que são iguais caso o critério de th_{30} seja atendido). O tempo de espera de 0,5s (30 ciclos em 60Hz) foi escolhido com base nos tempos utilizados na literatura, que geralmente encontram-se entre 80ms e 1s, conforme apresentado no Capítulo 3 deste trabalho. A função do tempo de espera é diferenciar a FAI de outros transitórios comuns em sistemas de distribuição, como, por exemplo, chaveamento de banco de capacitores.

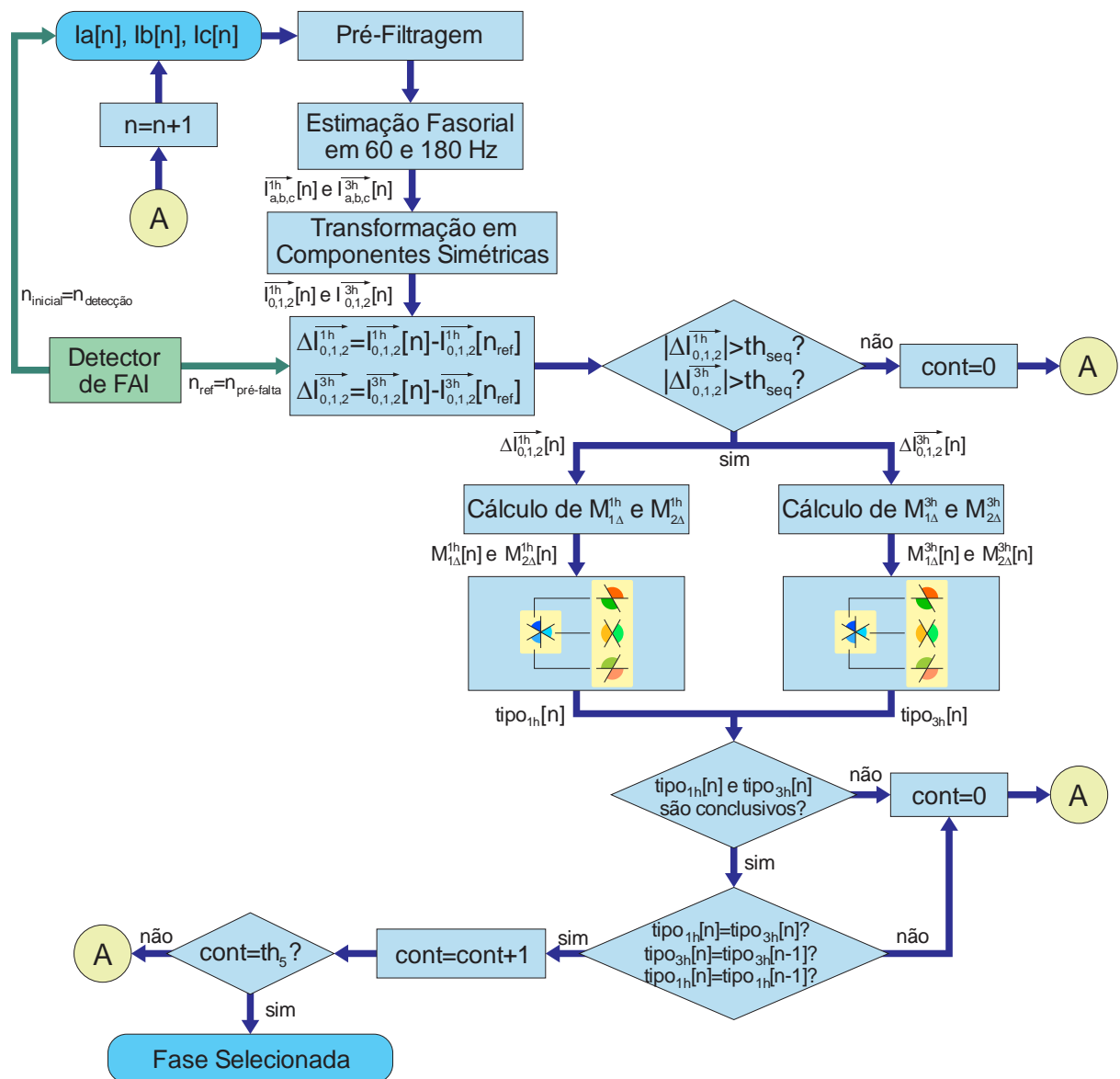
4.4.3 Algoritmo de Seleção de Fases para FAI

O algoritmo de seleção de fases proposto neste trabalho possui o objetivo único de indicar a fase sob falta, conforme fluxograma apresentado na Figura 4.10. O intuito desse algoritmo é sugerir um método que possa ser utilizado com detectores que não possuem a capacidade de seleção. Sendo assim, o método de seleção proposto considera a ação prévia de um detector de FAI, o qual indicará o instante inicial da falta ($n_{detecção}$), bem como o período de pré-falta, do qual se pode extrair o instante de pré-falta ($n_{pré-falta}$).

O algoritmo de seleção inicia sua análise a partir da amostra n , equivalente à amostra em que a FAI foi detectada ($n_{detecção}$). Em seguida, os sinais de corrente passam pelas mesmas etapas da pré-filtragem, estimação fasorial e transformação para componentes simétricas presentes no algoritmo detector da Figura 4.9. Realiza-

se então o cálculo dos fasores incrementais das componentes simétricas, no qual se utiliza uma amostra sempre fixa para n_{ref} , equivalente à amostra pré-falta ($n_{pré-falta}$) que se encontra dentro do período pré-falta delimitado pelo detector.

Figura 4.10 – Fluxograma do Algoritmo de Seleção de Fases para FAI



Fonte: O autor.

A partir dos fasores incrementais $\Delta \vec{I}_{0,1,2}^{1h}$ e $\Delta \vec{I}_{0,1,2}^{3h}$, o algoritmo de seleção segue os mesmos passos do algoritmo de detecção da Figura 4.9, exceto na tomada de decisão final, em que as variáveis $tip_{o_{h1}}$ e $tip_{o_{h3}}$ devem permanecer iguais (entre si) e inalteráveis (individualmente) em relação à amostra anterior por um período

equivalente a th_5 (= 5 ciclos). Nota-se que o tempo de espera de apenas 5 ciclos é bem inferior ao utilizado no detector de FAI (30 ciclos). Isso se justifica pelo fato de que o algoritmo selecionador não necessita discernir entre FAI e outros transitórios, uma vez que a presença do defeito já está estabelecida antes do seu funcionamento. A resposta final da seleção de fases é dada pelo valor das variáveis $tipo_{h1}$ ou $tipo_{h3}$, uma vez que ambas serão iguais caso o critério de th_5 seja atendido. O valor utilizado para th_{seq} , nesse algoritmo, também foi de 0,1A.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou conceitos do método de Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000), o qual é utilizado como base para o desenvolvimento dos algoritmos propostos neste trabalho. Esse método baseia-se na relação angular entre componentes simétricas e foi originalmente desenvolvido para atuação sob faltas de baixa impedância em linhas de transmissão, portanto houve a necessidade de realizar algumas adaptações no método original, de forma a garantir sua aplicabilidade perante todos os tipos de configurações de FAI em sistemas de distribuição. Durante a abordagem dessas alterações, ficou claro que a metodologia de relação angular de componentes simétricas pode ser prejudicada pela presença de desequilíbrio de carga no sistema, principalmente em relação às configurações FDS-C e FDS-FC. É interessante que essa metodologia seja analisada perante diferentes níveis de desequilíbrio de alimentadores de distribuição, de modo a verificar a aplicabilidade dos métodos nessas situações.

Por fim, foram apresentados os dois algoritmos desenvolvidos neste trabalho, ambos fundamentados na relação angular de componentes simétricas. O primeiro deles tem o objetivo de detecção e seleção de fases para FAI. Já o segundo realiza apenas a seleção de fases, considerando a ação prévia de um detector. Ambos os algoritmos possuem tomada de decisão a partir de valores de referência e tempos de espera. Essa prática pode ser considerada simples, porém é comumente utilizada em métodos de detecção presentes na literatura, conforme anteriormente abordado no Capítulo 3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através da implementação dos algoritmos de detecção e seleção de fases descritos no capítulo anterior. Serão abordadas as formas como foram conduzidas as simulações das faltas de alta impedância, bem como as características do sistema teste utilizado, baseado em dados de um alimentador real. O desempenho dos algoritmos será avaliado individualmente, considerando a variação de fatores como fase sob falta, desequilíbrio de carga do alimentador, superfície de alta impedância, distância entre a falta e a subestação e tipo de configurações de FAI. O algoritmo de detecção de FAI também será avaliado perante transitórios de corrente oriundos de chaveamento de banco de capacitores, de modo a averiguar possíveis respostas falso-positivas do método.

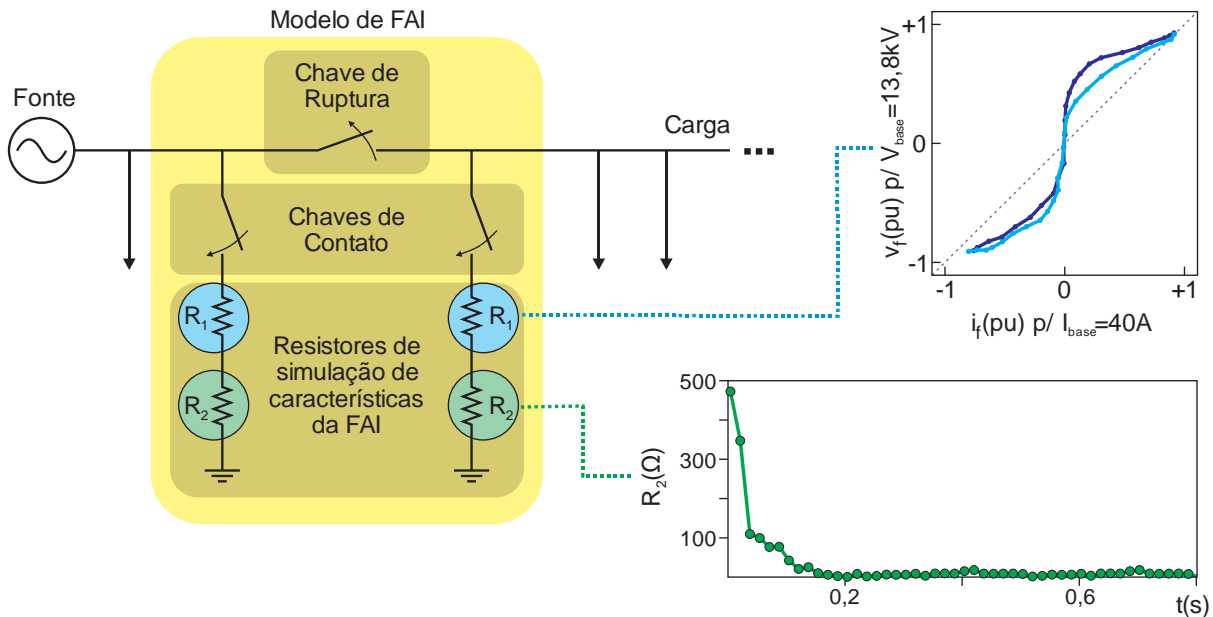
5.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

As simulações das faltas de alta impedância e chaveamento de banco de capacitores utilizadas neste trabalho foram realizadas a partir do *software* ATPDraw (pré-processador gráfico do ATP-EMTP), em que, para cada caso simulado, um arquivo *.mat* foi salvo, contendo as formas de onda das variáveis de interesse. Cada arquivo *.mat* foi carregado no *software* MATLAB®, no qual foram implementados os algoritmos de detecção e seleção de fases para faltas de alta impedância.

5.2.1 Modelagem da Falta de Alta Impedância

A Figura 5.1 apresenta o modelo completo utilizado para simular as faltas de alta impedância. Esse modelo possui como base a associação de dois resistores em série conforme apresentado em Nam et al. (2001), com algumas das características do modelo de Santos (2011). Todas as simulações realizadas possuem duração total de 3,5s e consideram faltas de alta impedância do tipo monofásicas. O modelo da Figura 5.1 é controlado através de um bloco MODELS presente no ATPDraw, que permite a programação das ações a serem realizadas durante a FAI. Sendo assim, é função do bloco MODELS comandar:

Figura 5.1 – Modelo para a Simulação de FAI



Fonte: O autor.

- Chaves de ruptura: são as chaves que simulam o rompimento do condutor em faltas do tipo FDS-F, FDS-C e FDS-FC. O instante de tempo padrão para o acionamento dessas chaves foi escolhido como 0,5s. Faltas do tipo FD não realizam a abertura de chaves de ruptura.
- Chaves de contato: realizam o contato de alta impedância. Essas chaves estão posicionadas tanto do lado da fonte quanto do lado da carga para que seja possível a simulação de todos os tipos de configurações de FAI. O instante de tempo padrão para acionamento dessas chaves foi escolhido como 1,8s. Esse instante está há exatos 1,3s do tempo de ruptura, de forma a simular o tempo de queda do condutor até estabelecer o contato com a superfície de alta impedância.
- Resistências R_1 e R_2 : são responsáveis por emular as características específicas das faltas de alta impedância. Enquanto R_1 simula as características de assimetria e não linearidade, R_2 simula as etapas de *buildup*, *shoulders* e aleatoriedade da amplitude da corrente. Na Figura 5.1, existe um par de resistências em cada lado do circuito para que seja possível simular a FAI tanto do lado da fonte quanto do lado da carga. As resistências R_1 e R_2 só possuem influência sobre o circuito a partir do

fechamento da sua respectiva chave de contato. A resistência total da FAI equivale à soma de R_1 e R_2 .

Para estimar a resistência R_1 , são utilizadas as curvas $V \times I$ apresentadas na Figura 2.2. Primeiramente é necessário verificar a tensão no ponto da falta $v_f(t)$, avaliando se sua derivada é positiva ou negativa. Em caso de derivada positiva, utilizam-se como base as curvas ascendentes da Figura 2.2. Caso contrário, faz-se uso das curvas descendentes. Em seguida, estima-se a corrente no ponto da falta $i_f(t)$ a partir de (5.1), que se trata de uma interpolação linear aplicada à curva escolhida (ascendente ou descendente). Por fim, o valor de $R_1(t)$ será igual à razão entre a tensão no ponto da falta $v_f(t)$ e a corrente $i_f(t)$ estimada em (5.1).

$$i_f(t) = \begin{cases} i_c[n] + \frac{i_c[n+1] - i_c[n]}{v_c[n+1] - v_c[n]} \cdot \Delta v, & \text{se } v_c[n] < v_f(t) < v_c[n+1] \\ i_c[n], & \text{se } v_f(t) = v_c[n] \end{cases} \quad (5.1)$$

Em que:

$v_f(t)$ é a tensão no ponto de falta no instante t da simulação;

$i_f(t)$ é a corrente no ponto de falta no instante t da simulação;

$v_c[n]$ é a tensão oriunda da curva $V \times I$ escolhida;

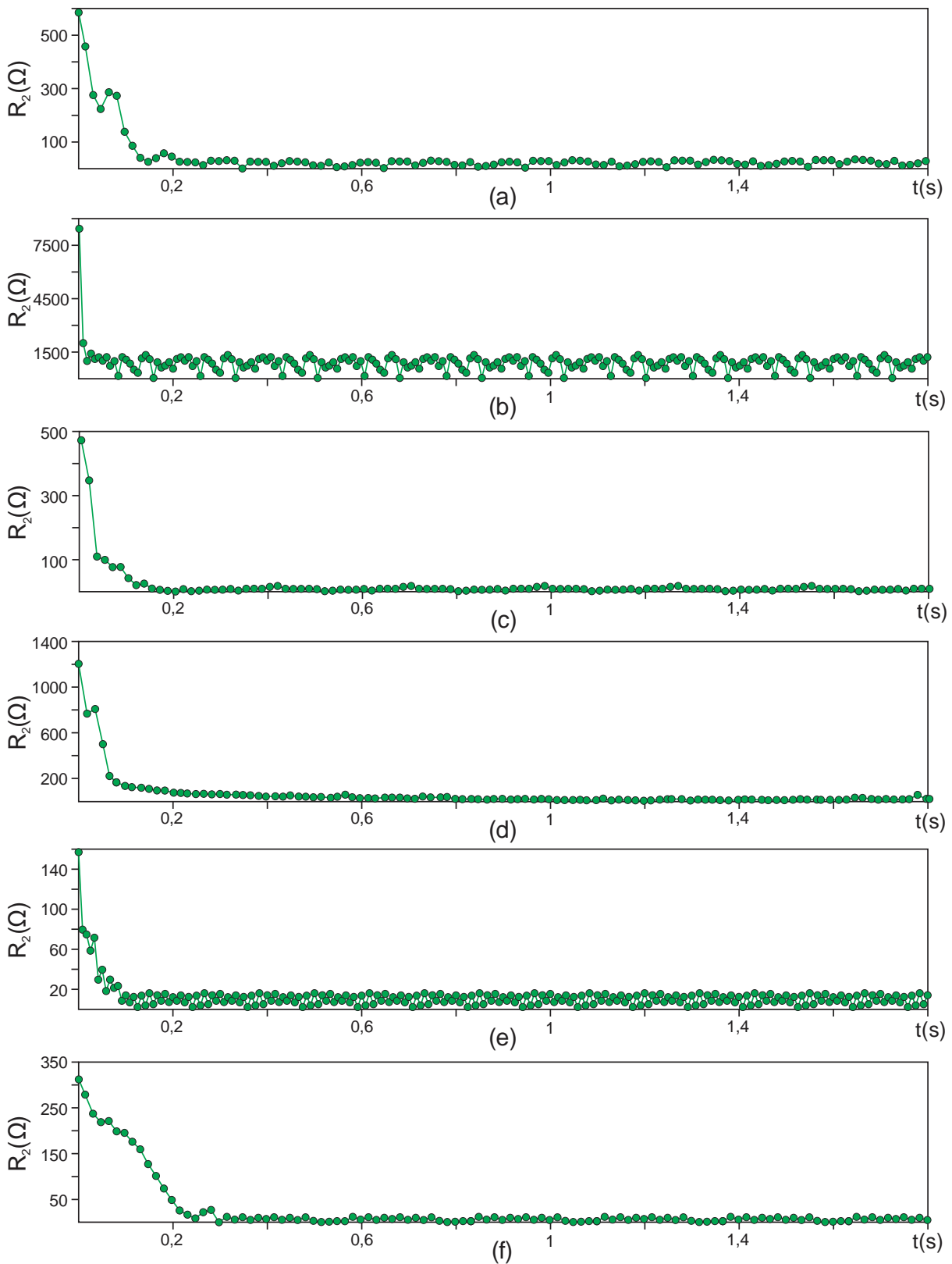
$i_c[n]$ é a corrente oriunda da curva $V \times I$ escolhida;

$\Delta v = v_f(t) - v_c[n]$;

n é a n -ésima amostra da curva $V \times I$ escolhida.

Já a resistência R_2 é estimada através das curvas apresentadas na Figura 5.2. Nessas curvas, a resistência é em função do tempo. Assim, $R_2(t)$ pode ser obtida também por interpolação linear, demonstrada em (5.2). As curvas da Figura 5.2 foram adaptadas de formas de onda de corrente apresentadas em Santos (2011, 2016).

Figura 5.2 – Comportamento da Resistência R_2 : (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) solo local



Fonte: O autor.

$$R_2(t) = \begin{cases} R_2[n] + \frac{R_2[n+1] - R_2[n]}{t[n+1] - t[n]} \cdot \Delta t, & \text{se } t[n] < t < t[n+1] \\ R_2[n], & \text{se } t = t[n] \end{cases} \quad (5.2)$$

Em que:

$R_2(t)$ é o valor da resistência R_2 para o instante t da simulação;

$\Delta t = t - t[n]$;

$R_2[n]$ e $t[n]$ são os dados relativos à Figura 5.2 em sua n -ésima amostra.

5.2.2 Modelagem do Sistema Teste

O sistema teste utilizado para as simulações das faltas de alta impedância foi modelado no *software* ATPDraw a partir de dados de um alimentador real. Esse alimentador possui tensão primária de operação de 13,8kV e conta com ramificações trifásicas e monofásicas ao longo de sua extensão, conforme traçado unifilar apresentado na Figura 5.3. Mais detalhes dos parâmetros do sistema teste estão presentes no Apêndice A.

Esse sistema teste foi implementado em três versões distintas, que consideram desequilíbrios de carga de 0% (sistema equilibrado), 20% e 40% nos circuitos de baixa tensão dos transformadores distribuídos ao longo do alimentador. O desequilíbrio de carga pode ser calculado através de (5.3) e foi obtido variando o carregamento de cada fase do circuito secundário de todos os transformadores trifásicos presentes no alimentador, conforme Tabela 5.1. Os desequilíbrios de carga foram escolhidos de forma a atingir valores próximos ao limite máximo de 20%, utilizado em algumas concessionárias para circuitos tanto de baixa quanto de média tensão, como, por exemplo, em Grupo Equatorial Energia (2017). Os níveis de desequilíbrios simulados neste trabalho são considerados altos e dificilmente são alcançados em condições normais de operação, principalmente em relação à porcentagem de 40%. Circuitos que possuem alto desequilíbrio geralmente passam por análises de redistribuição de carga, em que a potência total do circuito é redistribuída entre as fases de forma a atingir o maior equilíbrio possível. Contudo, apesar de extremos, os níveis de desequilíbrio considerados permitem averiguar se o desempenho dos algoritmos propostos é suficientemente robusto em relação a esse fator. Cabe ressaltar que o desequilíbrio de carga praticado na baixa tensão não reflete exatamente o

$$d(\%) = \frac{\max(I_{a,b,c}) - I_{m\u00e9dia}}{I_{m\u00e9dia}} \quad (5.3)$$

Em que:

$d(\%)$ é o valor de desequilíbrio de carga em porcentagem;

$\max(I_{a,b,c})$ refere-se à máxima corrente entre as fases A, B e C;

$I_{m\u00e9dia}$ é a média aritmética das correntes das fases A, B e C.

Tabela 5.1 – Características do Desequilíbrio de Carga Simulado

Desequilíbrio de Carga medido na Baixa Tensão	Carregamento por Fase			Desequilíbrio de Carga medido na Subestação
	A	B	C	
0%	100%	100%	100%	1,5323%
20%	100%	75%	75%	9,3431%
40%	100%	100%	50%	18,81%

Fonte: O autor.

As faltas de alta impedância foram simuladas em um total de quatro pontos do alimentador (Figura 5.3), obtendo-se faltas a diferentes distâncias em relação ao ponto de medição das correntes, localizado na subestação. As características de cada um dos pontos de simulação são apresentadas na Tabela 5.2. Foram gerados no total 864 casos, 288 deles em cada nível de desequilíbrio. Demais especificações das simulações de FAI estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.2 – Características dos Pontos de Simulação de FAI

Pontos de Simulação	Distância de Subestação (km)	Carga a Jusante do Ponto (%)
F1	0,345	≈ 98
F2	1,955	≈ 80
F3	5,150	≈ 33
F4	9,826	≈ 3

Fonte: O autor.

Tabela 5.3 – Detalhes dos Casos Simulados para FAI

Pontos	Fases	Solos	Configurações de FAI	Desequilíbrio de Carga
F1, F2, F3 e F4	A, B e C	areia, asfalto, brita, calçamento, grama e solo local	FD, FDS-F, FDS-C e FDS-FC	0%, 20% e 40%

Fonte: O autor.

Para a simulação dos chaveamentos de banco de capacitores, foram escolhidos dois pontos do sistema teste baseados nas posições atuais de instalação dos bancos reais do alimentador. Foram realizadas simulações variando a potência do banco de capacitores, o tipo de ligação e o instante de chaveamento, conforme dados da Tabela 5.4. O instante de chaveamento é estimado com base no ângulo da tensão na fase A no ponto de instalação do banco de capacitores. Ao todo, foram gerados 72 casos, que consideram a entrada individual de cada banco no sistema. Os bancos de capacitores foram modelados considerando potência fixa durante todo o período de simulação.

Tabela 5.4 – Detalhes dos Casos Simulados para Chaveamento de Banco de Capacitores

Pontos	Potência (kVAr)	Tipo de Ligação	Ângulo de Chaveamento
C1 e C2	300, 600 e 900	Delta, Estrela isolado e Estrela aterrada	0°, 30°, 60° e 90°

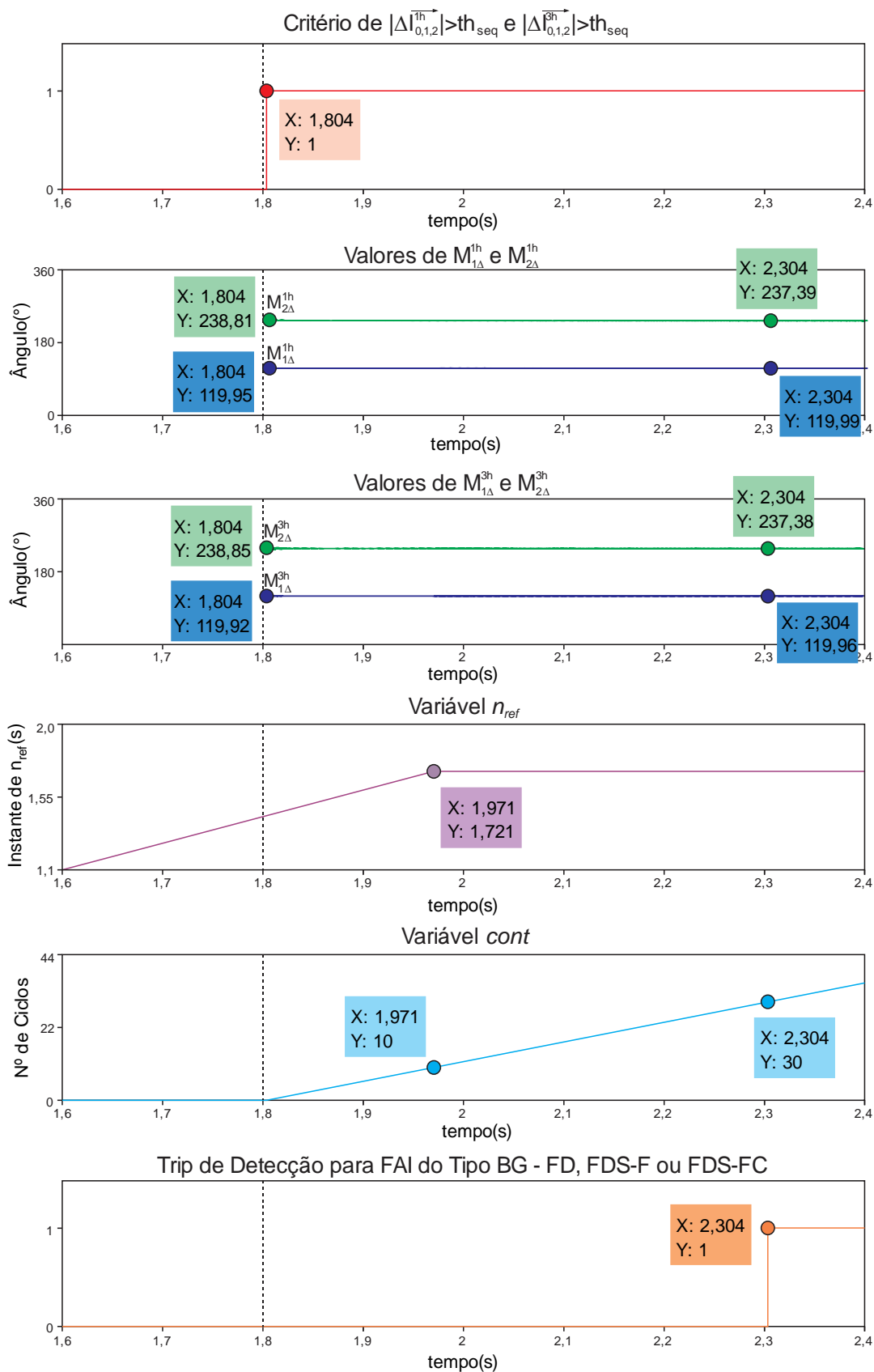
Fonte: O autor.

5.3 RESULTADOS DO ALGORITMO DETECTOR DE FAI

5.3.1 Caso Detalhado

A Figura 5.4 apresenta o detalhamento de um caso resultante da aplicação do algoritmo de detecção de FAI para uma falta no ponto F1, fase B e na configuração FD. A FAI inicia no instante 1,8s e ocorre em um solo do tipo solo local.

Figura 5.4 – Caso Detalhado para Detecção de uma FAI na Fase B



Fonte: O autor.

Nota-se que o critério relativo ao valor de referência th_{seq} é satisfeito logo após o início da falta, no instante 1,804s, e permanece ativo até o final da simulação. Isso significa que, no instante 1,804s, essa variável binária troca seu valor de 0 para 1, indicando que $|\overline{\Delta I_{0,1,2}^{1h}}|$ e $|\overline{\Delta I_{0,1,2}^{3h}}|$ são superiores ao valor de th_{seq} . Uma vez que esse critério é satisfeito, inicia-se o cálculo dos coeficientes de seleção para a frequência fundamental ($M_{1\Delta}^{1h}$ e $M_{2\Delta}^{1h}$) e para a terceira harmônica ($M_{1\Delta}^{3h}$ e $M_{2\Delta}^{3h}$).

Os valores encontrados nos coeficientes de seleção proporcionam indicação da presença de uma falta do tipo *BG - FD*, *FDS-F* ou *FDS-FC* desde o instante 1,804s, permanecendo quase que constantes até o final da simulação. Diante disso, a variável de contagem *cont* inicia seu processo de incrementação a cada iteração. Quando *cont* atinge o valor de 10 ciclos, nota-se que a variável de referência para cálculo de fasores incrementais n_{ref} para de ser recalculada e permanece fixa no valor de 1,721s, há exatamente 0,25s (15 ciclos) da amostra em que *cont* atingiu o total de 10 ciclos.

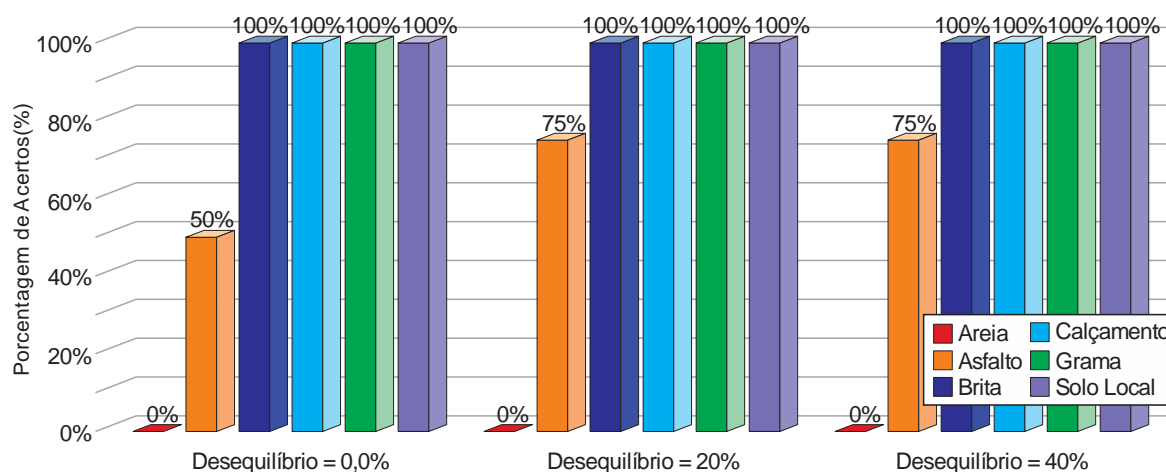
Em seguida, quando a variável *cont* atinge o valor de 30 ciclos, uma vez que os coeficientes de seleção, tanto para a frequência fundamental quanto para a terceira harmônica, permanecem quase que invariáveis, um sinal de *trip* de detecção é realizado aos 2,304s, indicando a presença de uma falta de alta impedância na fase *B* do sistema. A FAI pode estar na configuração *FD*, *FDS-F* ou *FDS-FC*. Durante todas as simulações realizadas para o detector, nenhuma FAI que foi detectada apresentou uma seleção de fases incorreta.

5.3.2 Influência da Configuração de FAI e Tipos de Solo

A Figura 5.5 apresenta o resultado da detecção para faltas de alta impedância na configuração *FD*. Cada barra da figura corresponde à porcentagem de acertos do algoritmo considerando o total de 12 casos testados para cada tipo de solo (3 fases x 4 pontos = 12 casos). Ao total, somando todos os casos do tipo *FD* (considerando os três graus de desequilíbrio), a porcentagem de acertos do algoritmo detector foi de 77,78%. Nota-se que os solos do tipo areia e asfalto foram aqueles que apresentaram os piores resultados. Isso se deve, principalmente, ao fato de que esses tipos de solo possuem os maiores valores de resistência de falta, o que gera menores correntes de falta e dificulta a detecção da FAI. Esse efeito é potencializado à medida que a FAI afasta-se do ponto de medição. Por exemplo, do total de 50% dos casos detectados

corretamente para o solo asfalto, considerando 0% de desequilíbrio, nenhum deles foi simulado nos pontos F3 e F4 (pontos mais afastados da subestação).

Figura 5.5 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI – Configuração FD



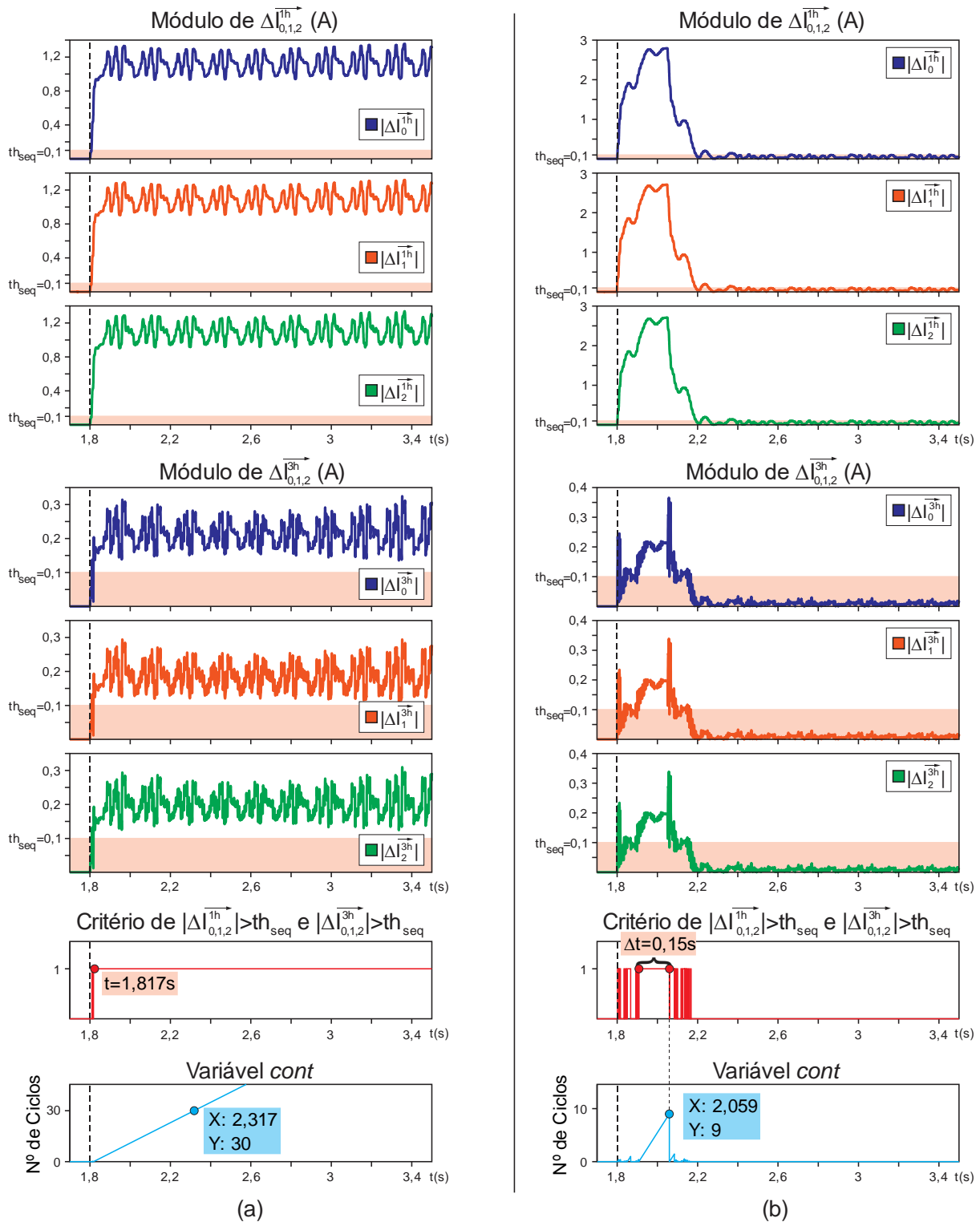
Fonte: O autor.

O solo asfalto, apesar de possuir os maiores valores de resistência de falta, ainda assim apresentou um desempenho superior ao solo areia para a configuração FD. A Figura 5.6 demonstra essa diferença entre o comportamento de uma FAI simulada sob as mesmas condições (configuração FD, ponto F1, fase A e $d = 0\%$) em solos do tipo asfalto e areia.

Para a FAI no solo asfalto (Figura 5.6a), logo após o início da falta (aos 1,8s), os módulos dos fasores incrementais em componentes simétricas tanto para a frequência fundamental quanto para terceira harmônica apresentam valores superiores a th_{seq} . Consequentemente, o critério de $|\Delta I_{0,1,2}^{1h}| > th_{seq}$ e $|\Delta I_{0,1,2}^{3h}| > th_{seq}$ é obedecido ininterruptamente desde o instante 1,817s, permitindo, nesse caso, que a FAI fosse detectada corretamente quando a variável *cont* atingisse o valor de th_{30} (30 ciclos). Já para o solo areia (Figura 5.6b), a FAI não é detectada, pois o critério de $|\Delta I_{0,1,2}^{1h}| > th_{seq}$ e $|\Delta I_{0,1,2}^{3h}| > th_{seq}$ é obedecido (ininterruptamente) por no máximo 0,15s, valor inferior aos 0,5s necessários à detecção. O maior limitante para isso são os valores de $|\Delta I_{0,1,2}^{3h}|$, que não conseguem se manter superiores a th_{seq} devido ao baixo conteúdo de terceira harmônica do solo areia. É necessário ressaltar que a curva V x I do solo asfalto possui maior não linearidade e, consequentemente, maior conteúdo

de terceira harmônica quando comparada à curva do solo areia, que é quase linear (Figura 2.2).

Figura 5.6 – Análise do Critério de th_{seq} : (a) solo asfalto; (b) solo areia



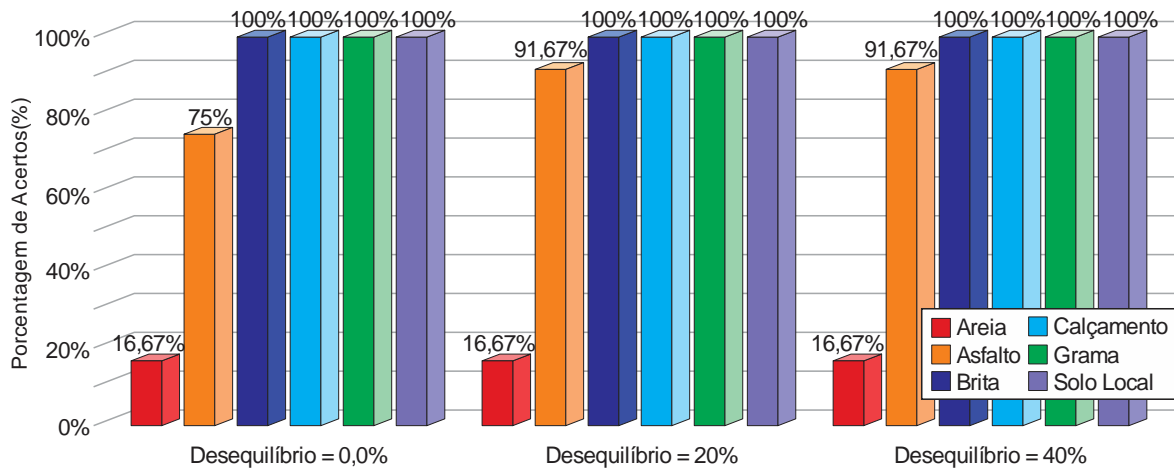
Fonte: O autor.

O curto período de 0,15s no qual $|\Delta \overline{I_{0,1,2}^{1h}}| > th_{seq}$ e $|\Delta \overline{I_{0,1,2}^{3h}}| > th_{seq}$ são satisfeitos, conforme a Figura 5.6b, também impacta os valores de $|\Delta \overline{I_{0,1,2}^{1h}}|$ e $|\Delta \overline{I_{0,1,2}^{3h}}|$, os quais, diferentemente da Figura 5.6a, apresentam um pico inicial que, após o instante 2,2s, estabiliza em valores, na maioria das vezes, inferiores a th_{seq} . Isso se deve ao fato de que, em 0,15s, a variável *cont* atinge o máximo de 9 ciclos – inferior ao valor de referência th_{10} (10 ciclos). Logo não há a fixação da amostra n_{ref} , e os fasores incrementais permanecem sendo calculados, indefinidamente, em relação a uma amostra 15 ciclos anteriores à amostra atual. Dessa forma, os valores de $|\Delta \overline{I_{0,1,2}^{1h}}|$ e $|\Delta \overline{I_{0,1,2}^{3h}}|$ relatam exatamente a quantidade de variação de corrente presente em cada instante de simulação. O pico inicial refere-se ao período transitório da FAI, em que ocorrem as maiores variações de corrente. Já o período de estabilização que ocorre após os 2,2s refere-se ao regime permanente da FAI, quando apenas pequenas variações são apresentadas pelas correntes. Esse fato não ocorre na Figura 5.6a, pois há a fixação de n_{ref} , uma vez que a variável *cont* atinge valores superiores a th_{10} .

Assim, de forma resumida, para a configuração FD, o solo areia não apresentou nenhuma resposta correta, sobretudo devido ao fato de que $|\Delta \overline{I_{0,1,2}^{3h}}|$ não superou o valor de 0,1A estabelecido para th_{seq} durante o tempo de espera necessário de 0,5s. O solo asfalto, por sua vez, teve um número de detecções corretas entre 50% e 75%, dependendo do grau de desequilíbrio do sistema. Para o restante dos tipos de solo (brita, calçamento, grama e solo local), cujas resistências de falta são mais baixas (em comparação com areia e asfalto) e, conseqüentemente, geram maiores correntes de falta, 100% dos casos testados foram detectados corretamente na configuração FD.

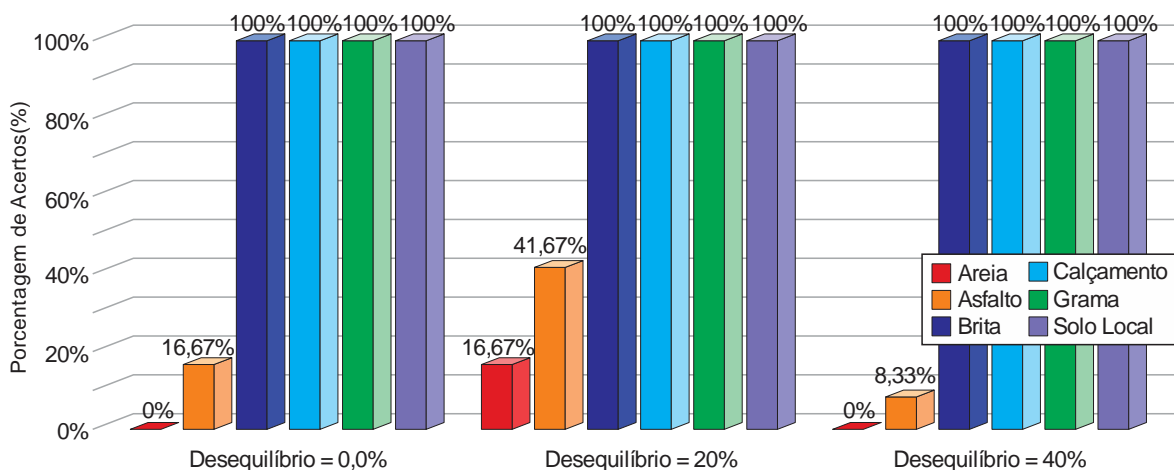
Um comportamento semelhante ao tipo FD foi obtido para as configurações FDS-F e FDS-FC, conforme demonstram a Figura 5.7 e a Figura 5.8, respectivamente. Essas configurações permanecem com um menor aproveitamento para faltas em solos do tipo areia e asfalto devido aos mesmos motivos anteriores. As faltas do tipo FDS-F obtiveram melhores resultados (total de 83,80% de aproveitamento) quando comparados à configuração FD, pois, como em faltas FDS-F há o rompimento do condutor, a tensão no ponto de falta eleva-se. Quanto maior a tensão no ponto de falta, maior será a corrente de falta, e, conseqüentemente, maiores serão as alterações medidas na subestação, facilitando, assim, a tarefa da detecção.

Figura 5.7 – Percentagem de Acertos na Detecção de FAI – Configuração FDS-F



Fonte: O autor.

Figura 5.8 – Percentagem de Acertos na Detecção de FAI - Configuração FDS-FC



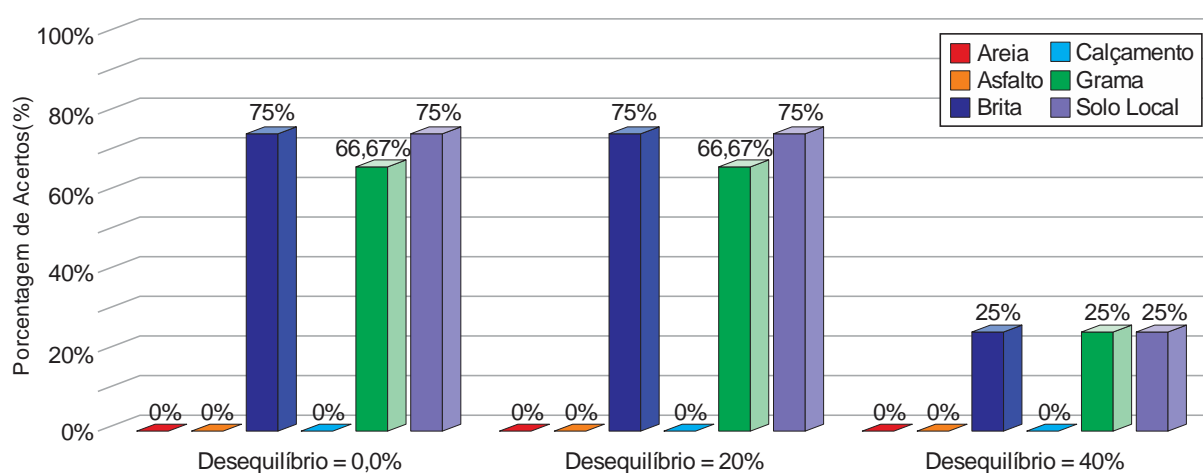
Fonte: O autor.

Já faltas na configuração FDS-FC, apesar de possuírem os efeitos do rompimento do condutor, também apresentam variações nas correntes das fases sãs superiores às encontradas em defeitos do tipo FD e FDS-F. Assim, para solos em que a corrente de falta já é pequena, quando se adicionam os efeitos provocados nas fases sãs, acaba-se por aumentar os erros na detecção da FAI. Isso ocorre com mais frequência em pontos mais próximos à subestação, onde as alterações nas fases sãs são mais perceptíveis e apresentam maior influência no método. Esse efeito é notável quando se compara o decaimento no aproveitamento de faltas detectadas para solos

do tipo areia e asfalto da Figura 5.7 (faltas FDS-F) para a Figura 5.8 (faltas FDS-FC). Para faltas FDS-FC, um total de 71,30% das faltas foram detectadas corretamente.

A Figura 5.9 apresenta os resultados para faltas de alta impedância do tipo FDS-C. Essa configuração apresentou os piores resultados dentre as faltas simuladas, fato já esperado, uma vez que o tipo FDS-C provoca alterações sutis nas correntes medidas na subestação. Portanto solos que possuem os maiores valores de resistência de falta tendem a apresentar os piores resultados, que, neste caso, foram os solos do tipo areia, asfalto e calçamento, nos quais nenhuma falta pôde ser detectada. Para o restante dos tipos de solos, as detecções realizadas corretamente concentraram-se, principalmente, nos pontos mais próximos à subestação. Nenhuma FAI simulada no ponto F4 (ponto mais afastado da medição) foi detectada pelo algoritmo. Ao total, reunindo todos os casos do tipo FDS-C, o algoritmo detector obteve um aproveitamento de apenas 28,24% de faltas detectadas.

Figura 5.9 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI – Configuração FDS-C



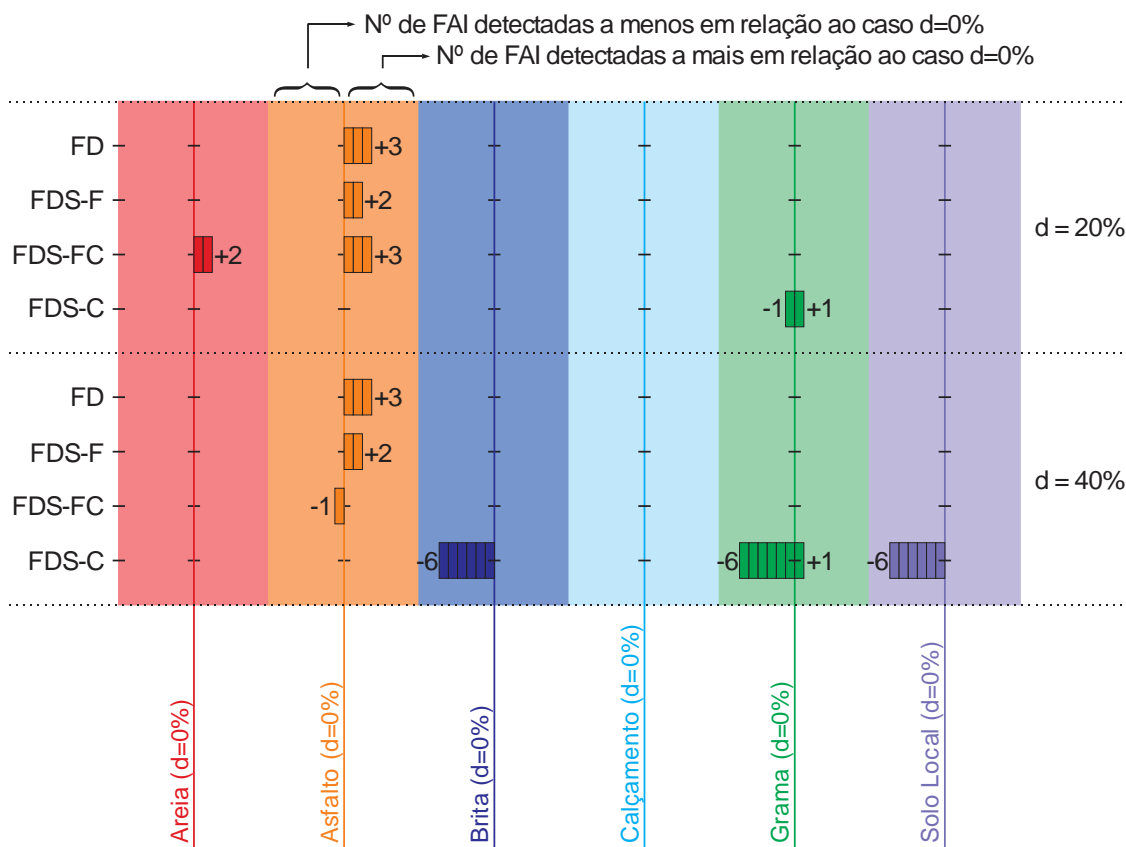
Fonte: O autor.

5.3.3 Influência do Desequilíbrio de Carga

Os resultados apresentados pelos quatro tipos de configurações de FAI demonstraram que o desequilíbrio de carga possui pouca influência sobre a detecção da falta. Esse fato fica mais claro na Figura 5.10, em que é apresentado o número de faltas detectadas, a mais ou a menos, em cada grau de desequilíbrio em relação aos resultados de detecção para o sistema equilibrado ($d = 0\%$). É possível notar que,

para $d = 20\%$, a ação do desequilíbrio de carga foi, na grande maioria dos casos, benéfica ao método, permitindo que um número maior de faltas fosse corretamente detectado. Isso ocorreu, pois alguns casos, no sistema equilibrado, apresentaram valores que satisfaziam o critério de $|\Delta I_{0,1,2}^{3h}| > th_{seq}$ por um curto período de tempo, insuficientemente duradouro para a detecção. Já com a ação do desequilíbrio, as correntes do alimentador alteraram-se suficientemente para que, nesses mesmos casos, o critério de $|\Delta I_{0,1,2}^{3h}| > th_{seq}$ fosse satisfeito pelos 0,5s necessários para a detecção da FAI. Apenas 4,16% dos casos com $d = 20\%$ apresentaram variação em sua resposta final quando comparados aos casos do sistema equilibrado.

Figura 5.10 – Análise Geral da Ação do Desequilíbrio de Carga em Relação ao Detector de FAI



Fonte: O autor.

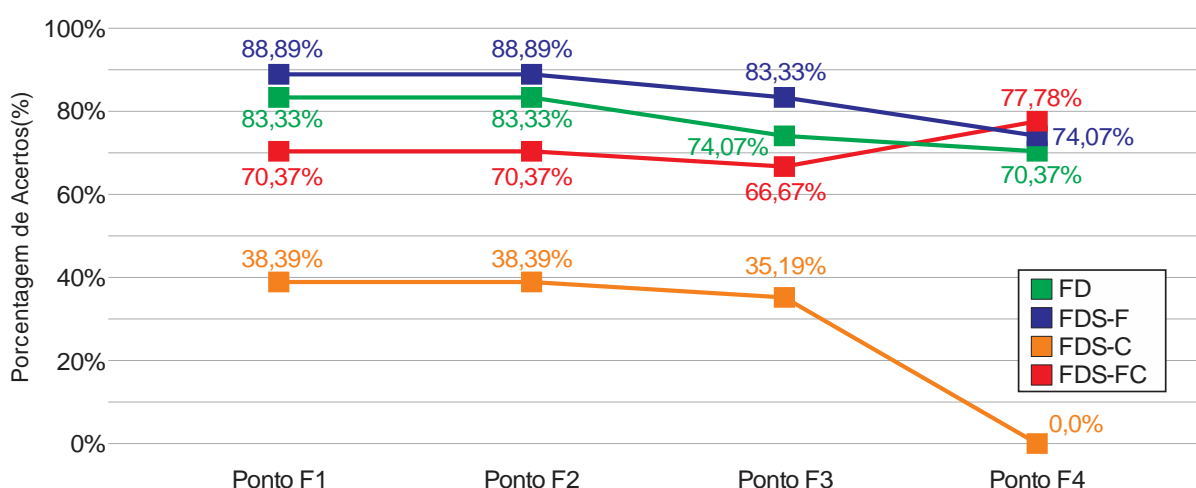
Ainda na Figura 5.10, é possível notar que o método de detecção sofreu uma maior influência em relação ao desequilíbrio de 40%, principalmente em faltas do tipo FDS-C. Todos os casos detectados a menos nesse tipo de configuração foram

resultado de respostas inconclusivas do detector. Em tais casos, o desequilíbrio de carga foi tão grande que foi capaz de fazer com que os coeficientes de seleção escapassem de seus respectivos sinos. Conforme anteriormente mostrado na Figura 4.7, a configuração FDS-C é a mais susceptível a esse tipo de efeito, uma vez que a abrangência de seus sinos de seleção é bem restrita. O restante dos casos que tiveram suas respostas alteradas perante o desequilíbrio de 40% foram novamente oriundas do critério $|\Delta J_{0,1,2}^{3h}| > th_{seq}$. Ao total, apenas 8,68% dos casos com $d = 40\%$ apresentaram variação em sua resposta final quando comparados aos casos do sistema equilibrado.

5.3.4 Influência da Distância da FAI em Relação à Subestação

A Figura 5.11 complementa os resultados de faltas de alta impedância corretamente detectadas de acordo com cada ponto de simulação. A porcentagem expressa em cada ponto do gráfico é relativa a 54 casos (3 desequilíbrios x 3 fases x 6 solos = 54 casos).

Figura 5.11 – Análise da Influência da Distância do Ponto da FAI no Detector de FAI



Fonte: O autor.

Pode-se notar que, para os dois pontos mais próximos da subestação (F1 e F2), a porcentagem de acertos do algoritmo permanece inalterada dentro de cada configuração de FAI. À medida que os pontos de simulação se afastam do ponto de

medição localizado na subestação, a tendência é que seja cada vez mais difícil de se perceber as variações de corrente provocadas pela FAI. Consequentemente, quanto menores as variações de corrente medidas na subestação, pior será o desempenho do algoritmo detector. Assim, para os pontos F3 e F4, os mais afastados da subestação, há uma queda na porcentagem de acertos do método, como pode ser observado nas configurações FD, FDS-F e FDS-C. Essa queda de aproveitamento é comum em metodologias que utilizam apenas um ponto de medição no alimentador.

Contudo, a configuração FDS-FC possui um comportamento diferente. Apesar de apresentar uma queda no percentual de acertos para o ponto F3, no ponto F4 é atingido o maior número de faltas detectadas correntemente para esse tipo de configuração. Esse fato pode ser explicado, pois, no ponto F4, o mais afastado da subestação, a influência das fases sãs é a menor dos quatro pontos de simulação, o que facilita a tarefa de detecção em uma FAI na configuração FDS-FC.

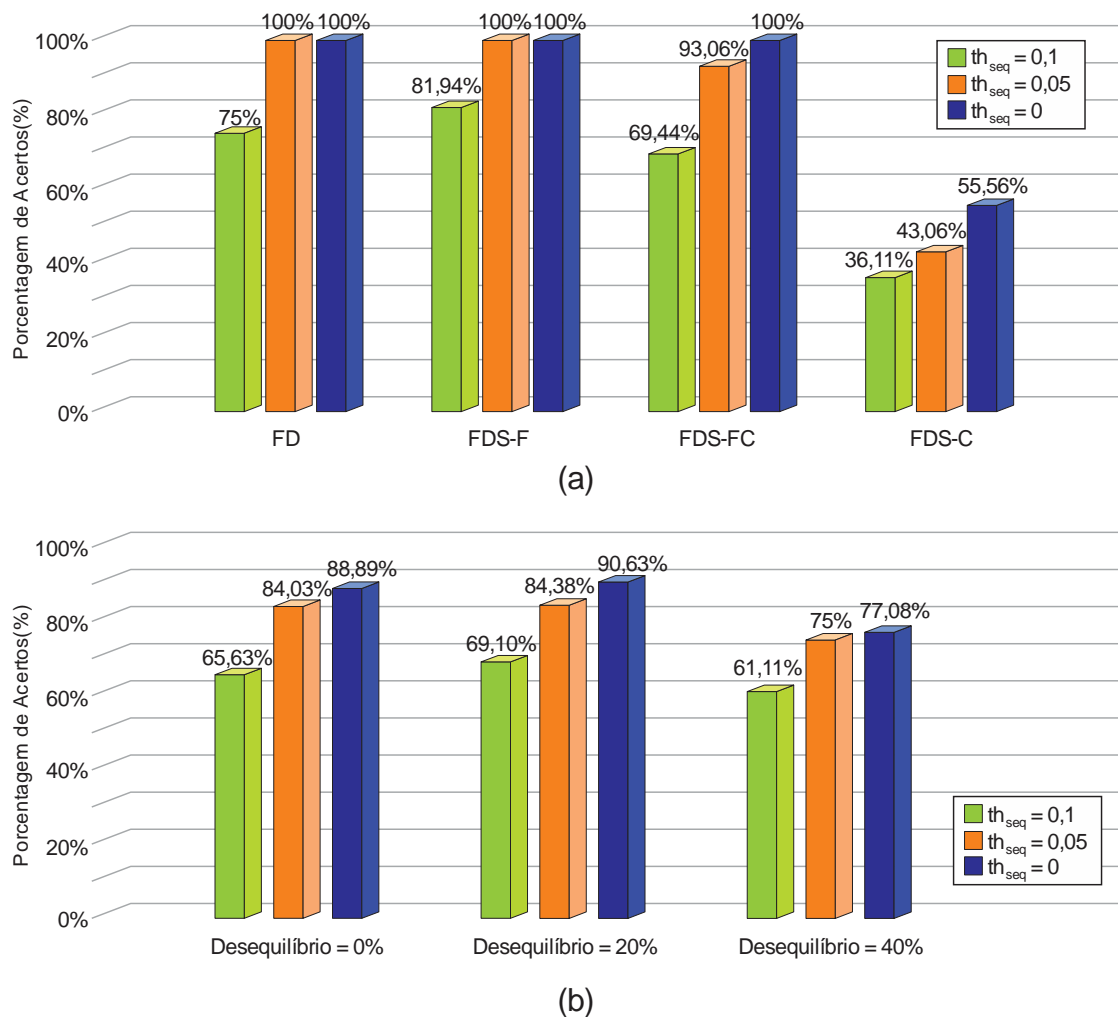
5.3.5 Influência da Variação de th_{seq}

A análise dos resultados anteriores mostrou que o valor de th_{seq} possui certa influência sobre o método. Assim, optou-se por reduzir o valor de th_{seq} e analisar o comportamento do algoritmo, cujos resultados são apresentados na Figura 5.12. De modo geral, a redução do valor de th_{seq} faz com que aumente a quantidade de FAI detectadas. Esse aspecto pode ser notado tanto entre os tipos de configuração de FAI (Figura 5.12a) quanto entre os níveis de desequilíbrio de carga (Figura 5.12b). Contudo, uma redução no valor de th_{seq} acarreta uma alteração na sensibilidade do método, aumentando a possibilidade de detecções falso-positivas, de modo que outros transitórios ocorridos no circuito possam ser detectados erroneamente como faltas de alta impedância.

Com objetivo de submeter o algoritmo detector a possíveis operações falso-positivas, esse método foi avaliado diante de transitórios ocasionados pelo chaveamento de banco de capacitores. Esse tipo de transitório também provoca aumentos na magnitude da corrente de terceira harmônica, o que poderia sensibilizar o algoritmo de detecção de FAI. Porém, devido ao uso do tempo de espera de 30 ciclos, nenhum dos 72 casos desse tipo de chaveamento provocou falsas operações ao detector, mesmo perante valores nulos de th_{seq} . Apesar de gerar alterações na corrente de terceira harmônica, os transitórios de banco de capacitores têm sua

duração muito inferior a 30 ciclos, o que garante a imunidade do algoritmo detector perante esse fator.

Figura 5.12 – Porcentagem de Acertos na Detecção de FAI através da Variação de th_{seq} : (a) por configuração de FAI ($d = 0\%$); (b) por nível de desequilíbrio



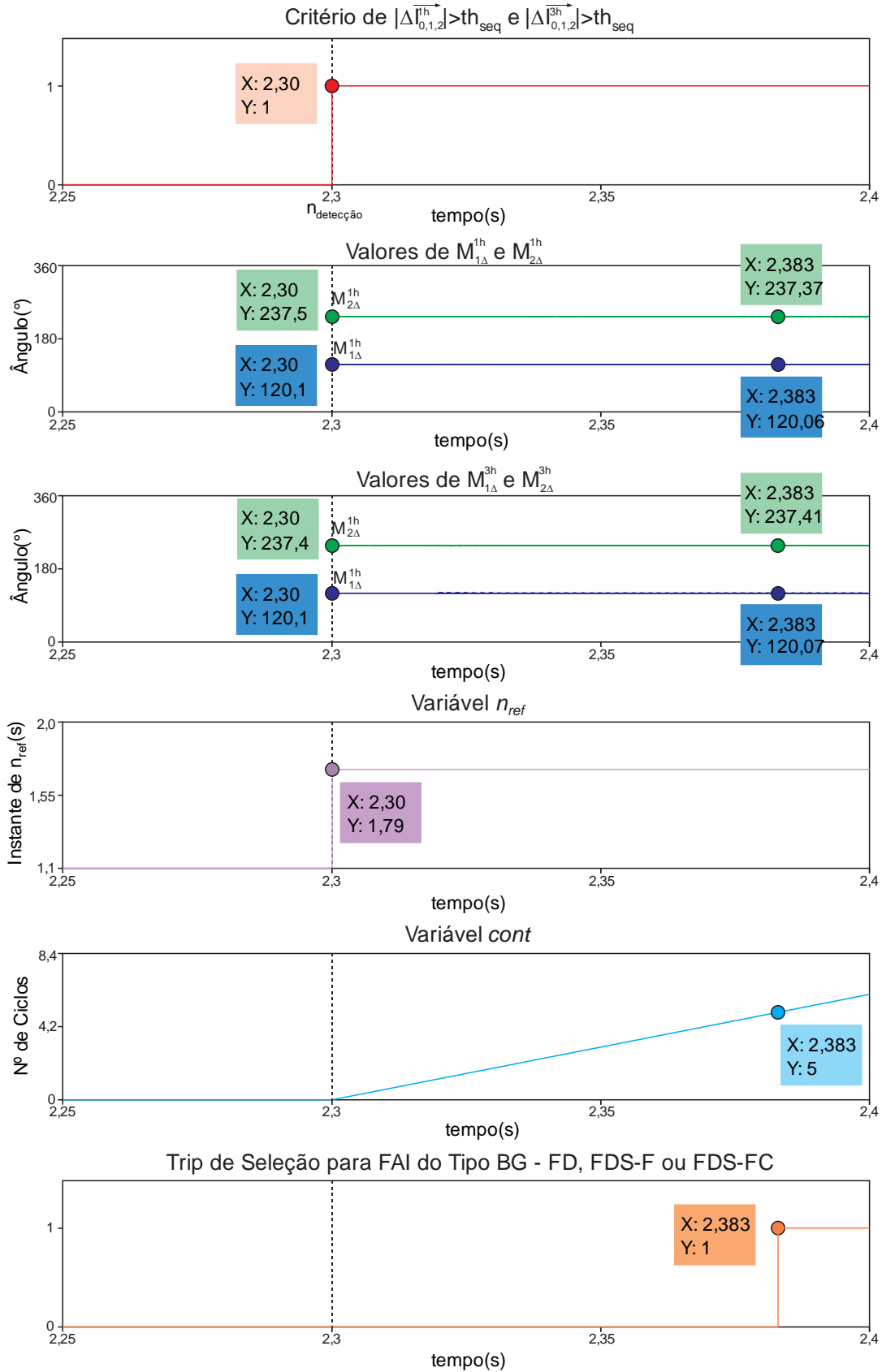
Fonte: O autor.

5.4 RESULTADOS DO ALGORITMO DE SELEÇÃO DE FASES PARA FAI

5.4.1 Caso Detalhado

A Figura 5.13 apresenta o detalhamento de um caso resultante da aplicação do algoritmo de seleção de fases para uma FAI no ponto F1. Essa falta foi realizada na fase B, em configuração FD e considerando um solo do tipo solo local.

Figura 5.13 – Caso Detalhado para Seleção de Fases



Fonte: O autor.

O algoritmo seletor de fases considera a ação prévia de um detector de FAI que indica o instante de início do defeito, bem como o instante de pré-falta. Para esse caso, presume-se que a FAI foi supostamente detectada aos 2,3s. O instante pré-falta utilizado é de 1,79s.

A inicialização do algoritmo de seleção de fases é realizada a partir do momento em que a FAI é detectada no sistema, o que, neste caso, ocorreu aos 2,3s. Desde esse instante de detecção, é possível notar que o critério de th_{seq} já é satisfeito para $|\Delta_{0,1,2}^{1h}|$ e $|\Delta_{0,1,2}^{3h}|$, sem alterar seu estado ao longo de toda a simulação. Percebe-se também que, diferentemente do algoritmo detector, o selecionador de fases utiliza uma amostra n_{ref} sempre fixa para a determinação dos fasores incrementais das componentes simétricas. O valor da amostra n_{ref} é equivalente ao valor do instante pré-falta (1,79s).

Com o critério de th_{seq} satisfeito, é possível dar início ao cálculo dos coeficientes de seleção tanto para a frequência fundamental quanto para a terceira harmônica. O comportamento dos coeficientes $M_{1\Delta}^{1h}$, $M_{2\Delta}^{1h}$, $M_{1\Delta}^{3h}$ e $M_{2\Delta}^{3h}$ se apresenta praticamente constante ao longo de toda a simulação. Logo o processo de incrementação da variável $cont$ não sofre interrupções. Quando $cont$ atinge o total de 5 ciclos (valor de th_5), tem-se então uma resposta conclusiva à seleção de fases, em que a falta é apontada como do tipo *BG* na configuração FD, FDS-F ou FDS-FC.

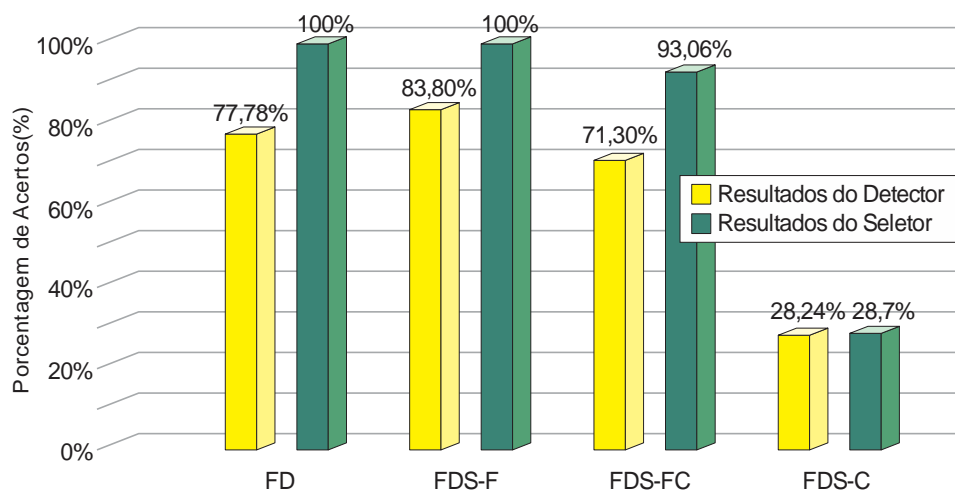
5.4.2 Comparação de Desempenho entre os Algoritmos de Detecção e de Seleção de Fases

Os mesmos casos utilizados para a validação do algoritmo de detecção foram empregados para testar o algoritmo com função exclusiva de seleção de fases. A metodologia de seleção utilizou o instante 1,79s como valor de pré-falta, 0,01s antes do início da FAI (que ocorre aos 1,8s). O valor utilizado para a variável th_{seq} foi inicialmente de 0,1A.

A Figura 5.14 apresenta os resultados obtidos para a seleção de fases em comparação aos resultados anteriormente alcançados pelo detector de FAI. Cada barra da figura representa o aproveitamento do método em relação à soma dos casos nos três níveis de desequilíbrio, que contabilizam o total de 216 casos em cada configuração. Nota-se que a porcentagem de acertos da seleção é superior à de

detecção para todos os tipos de configuração. Isso se justifica, principalmente, pelo uso de uma amostra de referência fixa e de um tempo de espera reduzido (de apenas cinco ciclos) por parte do algoritmo selecionador. As configurações FD, FDS-F e FDS-FC foram as que apresentaram maiores aproveitamentos (superiores a 90%) e evoluções em relação aos resultados do algoritmo de detecção. Já faltas na configuração FDS-C obtiveram praticamente o mesmo resultado da detecção – apenas um caso a mais apresentou resultado conclusivo no algoritmo selecionador.

Figura 5.14 – Comparação entre os Resultados Obtidos Para o Detector de FAI e Selecionador de Fases



Fonte: O autor.

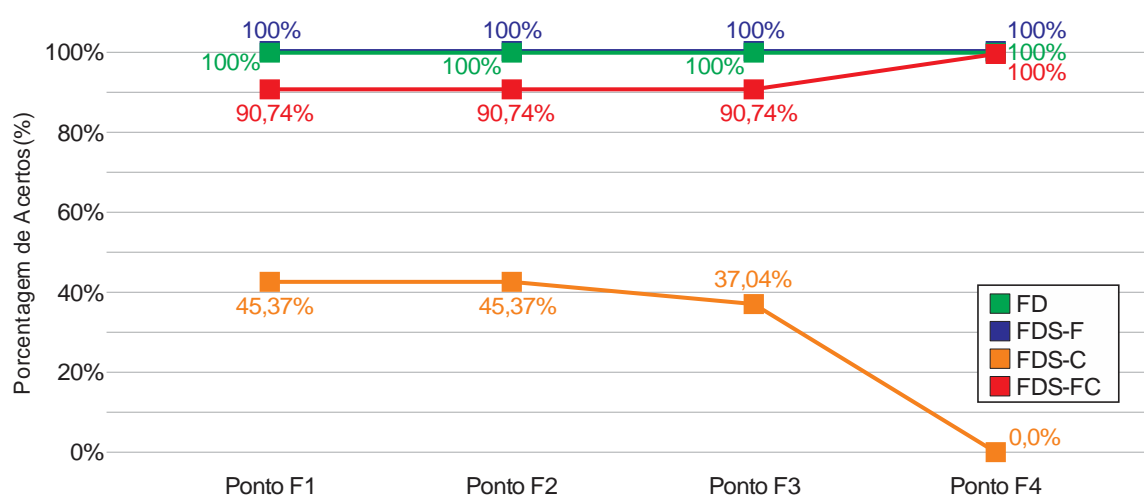
O desempenho do algoritmo de seleção de fases em relação ao desequilíbrio de carga foi semelhante ao encontrado no algoritmo detector. Para o desequilíbrio de carga de 20%, apenas 2,43% dos casos apresentaram alteração de resultado quando comparados aos casos do sistema equilibrado. Desse total, 100% das alterações foram benéficas ao método, fazendo com que mais casos fossem corretamente selecionados. Já em relação ao desequilíbrio de 40%, cerca de 9,72% dos casos sofreram alteração de resultado na comparação com o sistema equilibrado. Dessa porcentagem, 78,57% foram casos de faltas na configuração FDS-C, que obtiveram respostas inconclusivas devido aos coeficientes de seleção terem permanecido fora dos sinos de seleção. É importante destacar que, seja no uso do algoritmo de detecção, seja no uso do algoritmo de seleção, não houve nenhum caso em que uma fase incorreta foi apontada como resultado final (por exemplo, indicar que a falta

ocorreu na fase A quando na realidade ocorreu na fase B), ocorreram apenas casos em que a resposta final foi inconclusiva.

5.4.3 Influência da Distância da FAI em Relação à Subestação

O comportamento do algoritmo de seleção de fases também foi semelhante ao do detector quanto à variação da distância do ponto de falta, conforme demonstra a Figura 5.15. Para FAI na configuração FD e FDS-F, os resultados encontrados para todos os pontos de simulação (considerando todos os níveis de desequilíbrio de carga) mostraram que 100% das faltas tiveram a seleção de fases realizada de forma correta, em concordância com os resultados da Figura 5.14. Para a configuração FDS-FC, novamente há um ganho de desempenho no ponto F4 em relação ao restante dos pontos, devido à menor influência das alterações nas fases sãs quando medidas na subestação. Por fim, para a configuração FDS-C, o pior desempenho foi encontrado no ponto F4, em que nenhuma seleção de fases foi realizada corretamente devido às sutis alterações de corrente provocadas por essa configuração, as quais são atenuadas ainda mais à medida que se aumenta a distância entre a FAI e o ponto de mediação (subestação).

Figura 5.15 – Análise da Influência da Distância do Ponto da FAI no Seleccionador de Fases

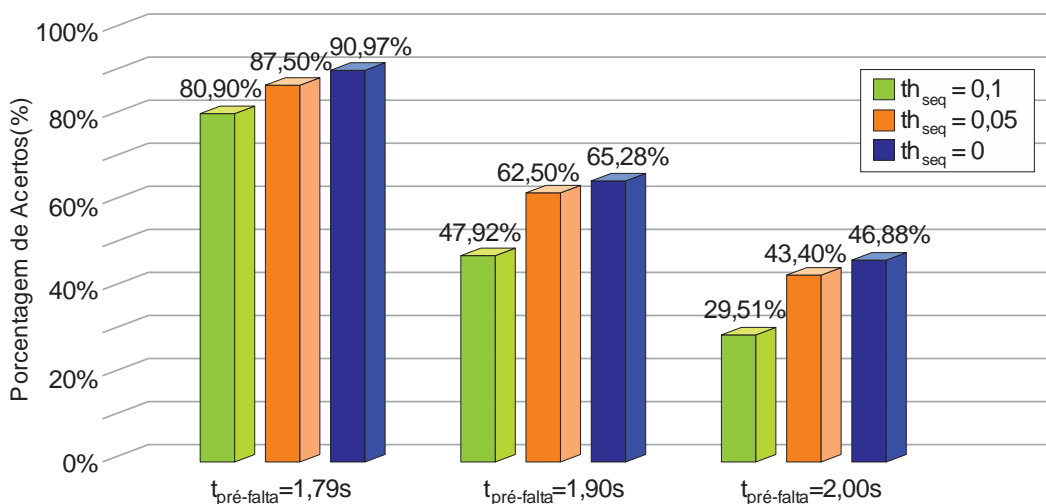


Fonte: O autor.

5.4.4 Influência da Variação do Instante de Pré-falta e th_{seq}

A influência da escolha do instante de pré-falta, bem como do valor de th_{seq} , é avaliada na Figura 5.16. Para a variável th_{seq} , o comportamento é o mesmo encontrado para o detector de FAI: à medida que th_{seq} diminui, a porcentagem de acertos do método aumenta devido à menor restrição em relação ao valor do módulo dos fasores incrementais das componentes simétricas.

Figura 5.16 – Porcentagem de Acertos do Seleccionador Considerando Variação do Instante Pré-falta e th_{seq} ($d = 0\%$)



Fonte: O autor.

Quanto à variação do instante de pré-falta, foram escolhidos os valores de 1,79s, 1,9s e 2,0s, sendo apenas o primeiro valor realmente encontrado antes do início da falta. Os outros dois, 1,9s e 2,0s, simulam situações em que o instante de pré-falta não pode ser estimado precisamente. Pode-se notar que, à medida que o instante de pré-falta se aproxima do instante de detecção (2,3s), pior é o aproveitamento do método. Isso ocorre, pois, quanto mais próximo do instante de detecção, menores são os valores incrementais das correntes devido à forma como as faltas foram modeladas. Por exemplo, na Figura 5.2, os valores da resistência R_2 tendem a ser muito altos no início, os quais decaem rapidamente para valores menores, em cerca de 0,2s, na maioria dos solos. Logo, a corrente de falta apresentará maiores variações nesse mesmo período inicial, ou seja, à medida que avança o instante pré-falta, uma menor extensão desse período com maiores variações é analisada pelo método de

seleção. Portanto a correta escolha do instante pré-falta para o uso no algoritmo de seleção de fases é de suma importância para o método.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados obtidos para a avaliação da eficácia dos algoritmos propostos para faltas de alta impedância, simuladas em um sistema teste baseado em um alimentador real. Foram consideradas faltas em diversas superfícies de alta impedância (diferentes solos), bem como sob diferentes configurações e níveis de desequilíbrio de carga.

Primeiramente, abordou-se o desempenho do algoritmo de detecção. Em geral, foram demonstrados melhores resultados para aqueles solos que geravam maiores correntes de falta ou que apresentavam correntes com maior grau de não linearidade e, conseqüentemente, maior conteúdo de terceira harmônica. Sendo assim, o solo areia foi o que apresentou os piores resultados, seguido do solo asfalto. Quanto às configurações de FAI do tipo FD, FDS-F, FDS-FD e FDS-C, a porcentagem de faltas detectadas corretamente em um sistema equilibrado foi de 75%, 81,94%, 69,44% e 36,11%, respectivamente. O tempo médio de resposta do algoritmo detector foi de 0,52s após o início das faltas de alta impedância simuladas.

A ação do desequilíbrio de carga não demonstrou influência significativa sobre o desempenho do método de detecção. Para um desequilíbrio de 20%, cerca de 4,16% dos casos demonstraram alterações em relação às respostas do sistema equilibrado. Já para o desequilíbrio de 40%, essa porcentagem subiu para 8,68%. Apesar do aumento, é necessário compreender que a porcentagem de variação de resultados do método é mínima se comparada à de um nível de desequilíbrio tão elevado quanto 40%. Esse fato revela a robustez do método em relação ao desequilíbrio de carga do sistema. A configuração de falta mais afetada pela ação do desequilíbrio foi o tipo FDS-C.

O algoritmo de detecção de FAI também foi submetido a 72 casos relativos a chaveamentos de bancos de capacitores, nos quais nenhuma operação falso-positiva foi relatada mesmo perante a redução dos valores de referência utilizados pelo método. Apesar do bom desempenho diante de chaveamentos de bancos de capacitores, isso não significa que a metodologia de detecção não possa ser sensibilizada por outros distúrbios, sendo esse um fator ainda a ser estudado.

Para o algoritmo de seleção de fases, o comportamento dos resultados obtidos foi semelhante ao encontrado para o algoritmo detector, uma vez que ambos os métodos são baseados no mesmo princípio. Porém, devido ao menor tempo de espera utilizado no algoritmo selecionador (6 vezes menor que no detector), obteve-se uma porcentagem de acertos maior para a seleção de fases. Considerando um sistema equilibrado, a porcentagem de faltas selecionadas corretamente para as configurações de FAI do tipo FD, FDS-F, FDS-FD e FDS-C foi de 100%, 100%, 87,50% e 36,11%, respectivamente. O algoritmo de seleção de fases mostrou-se vulnerável à escolha do instante de pré-falta a ser utilizado, de modo que esse fator deve ser estudado antes da aplicação dessa metodologia juntamente a um detector de faltas. Contudo essa é uma característica comum à maioria dos algoritmos que fazem uso de valores pré-falta.

Por fim, ambos os algoritmos propostos apresentaram acréscimo em relação à porcentagem de acertos à medida que o valor de referência th_{seq} foi reduzido.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs um método de detecção e outro de seleção de fases para faltas de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica. Ambas as metodologias são baseadas em Kasztenny, Campbell e Mazereeuw (2000), porém o método original foi devidamente alterado para garantir sua aplicação para faltas de alta impedância. Os métodos propostos são fundamentados na determinação de dois coeficientes, $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$, calculados a partir da relação angular entre as componentes simétricas dos fasores de corrente medidos a partir da subestação. Esses coeficientes são determinados a partir dos fasores de corrente calculados para a frequência fundamental, bem como para a terceira harmônica, uma das principais características de uma FAI. Tanto o método de detecção quanto o de seleção baseiam-se no monitoramento dos coeficientes $M_{1\Delta}$ e $M_{2\Delta}$ durante a falta. Os métodos propostos foram avaliados perante a variação de fatores como nível de desequilíbrio de carga do alimentador, tipo de configuração da FAI, tipo de superfície de alta impedância, fase sob falta e distância entre a FAI e o ponto de medição.

Os resultados obtidos demonstraram o bom desempenho dos métodos principalmente em relação a faltas de alta impedância nas configurações FD, FDS-F e FDS-FC. Considerando um sistema equilibrado, o melhor desempenho foi encontrado para a configuração FDS-F, na qual a porcentagem de acertos foi de 81,94% para o algoritmo detector e 100% para o algoritmo de seleção de fases. Já o pior desempenho foi obtido em relação à configuração FDS-C, em que ambos os algoritmos demonstraram aproveitamentos inferiores a 40% para o sistema em equilíbrio. Embora essa porcentagem possa ser aumentada a partir da alteração dos valores de referência utilizados nos métodos, é necessário ter cautela nessa operação. A redução de valores de referência pode resultar em um aumento da sensibilidade dos métodos e, conseqüentemente, um aumento da possibilidade de operações falso-positivas ou a indicação errônea da fase sob falta. Contudo, apesar do baixo aproveitamento em faltas do tipo FDS-C, os métodos propostos neste trabalho estão dentre as poucas metodologias existentes na literatura especializada que apresentam resultados relativos a esse tipo de configuração de FAI. Além disso, os métodos propostos também não demonstraram sofrer influência significativa em relação à presença de desequilíbrio de carga no circuito, fator característico de redes de distribuição. O método de detecção ainda foi avaliado perante distúrbios referentes

a chaveamento de banco de capacitores, e nenhuma operação falso-positiva foi obtida.

Os métodos apresentados neste trabalho destacam-se por sua simplicidade e sua facilidade de implementação em relés e religadores, uma vez que podem ser resumidos ao uso de estimação fasorial e uma transformada linear para a obtenção das componentes simétricas, funções usualmente presentes nesses equipamentos. Sendo assim, a simplicidade, aliada a fatores como a aplicabilidade para diferentes configurações de FAI e o bom desempenho quanto ao desequilíbrio de carga, faz com que os métodos propostos mostrem-se como uma boa alternativa tanto para detecção quanto para seleção de fases em faltas de alta impedância em sistemas de distribuição.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros a serem elaborados a partir das metodologias desenvolvidas neste trabalho:

- Criação de um procedimento para a determinação dos valores de referência e tempos de espera;
- Criação de um procedimento para a determinação do instante de pré-falta a ser utilizado no algoritmo de seleção de fases;
- Criação de uma metodologia para a diferenciação entre FAI nas configurações FD, FDS-F, FDS-FC e FDS-C;
- Análise dos métodos perante fatores como chaveamento de carga, presença de ruídos, energização de transformadores, presença de cargas não lineares, entre outros;
- Avaliação do uso de mais de um ponto de medição ao longo do alimentador;
- Validação com oscilografias reais de faltas de alta impedância;
- Validação perante simulação em tempo real;
- Implementação em *hardware*.

REFERÊNCIAS

2009 VICTORIAN BUSHFIRES ROYAL COMMISSION. **Final Report - The Fires and the Fire-related Deaths**. Victoria: [s.n.], 2010.

AUCOIN, B. M.; RUSSELL, B. D. Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components. **IEEE Power Engineering Review**, v. PER-2, n. 6, p. 46–47, 1982.

AUCOIN, M. Status of High Impedance Fault Detection. **IEEE Power Engineering Review**, n. 3, p. 39–40, 1985.

AUCOIN, M.; RUSSELL, B. D. Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals Near 60 Hz. **IEEE Power Engineering Review**, v. PER-7, n. 4, p. 40–41, 1987.

BALSER, S. J.; LAWRENCE, D. J.; CLEMENTS, K. A. A Microprocessor-Based Technique for Detection of High Impedance Faults. **IEEE Power Engineering Review**, v. PER-6, n. 7, p. 59–60, 1986.

CHAKRABORTY, S.; DAS, S. Application of Smart Meters in High Impedance Fault Detection on Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 3, p. 3465–3473, 2019.

EMANUEL, A. E. et al. High impedance fault arcing on sandy soil in 15kV distribution feeders: Contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, p. 676–686, 1990.

ETEMADI, A. H.; SANAYE-PASAND, M. High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 2, n. 1, p. 110–118, 2008.

FANUCCHI, R. Z. **A Detecção e a Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais**. 2014. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

FARIAS, P. E. **Detecção e Classificação de Transitórios em Redes de Distribuição para Identificação de Falhas de Alta Impedância**. 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

FARIAS, P. E. **Método para Estimação da Distância de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Diferentes Tipos de Solo**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918.

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, 2013.

GHADERI, A. et al. High-impedance fault detection in the distribution network using time-frequency-based algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 3, p. 1260–1268, 2015.

GHADERI, A.; GINN, H. L.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. **Electric Power Systems Research**, v. 143, p. 376–388, 2017.

GODOY, E. et al. Tutorial on Single-Pole Tripping and Reclosing. **39th Annual Western Protective Relay Conference**, 2012.

GRUPO EQUATORIAL ENERGIA. **Critérios de Projetos de Redes de Distribuição**. [S.l.: s.n.], 2017.

HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas de Comunicação**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

HUANG, S.; LUO, L.; CAO, K. A novel method of ground fault phase selection in weak-infeed side. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 5, p. 2215–2222, 2014.

KASZTENNY, B.; CAMPBELL, B.; MAZEREEUW, J. Phase Selection for Single-Pole Tripping weak infeed conditions and cross country faults. **27th Annual Western Protective Relay Conference**, p. 1–19, out. 2000.

LEITE, M. P. **Identificação e Localização de Falhas de Alta Impedância Utilizando Medidores Inteligentes**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

LIMA, É. M. **Proposição de um Método de Detecção de FAI Baseado nos Componentes Harmônicos de Baixa Frequência**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

LIMA, É. M.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. de. High impedance fault detection based on Stockwell transform and third harmonic current phase angle. **Electric Power Systems Research**, v. 175, p. 1–5, 2019.

LIU, J. et al. **Fault Location and Service Restoration for Electrical Distribution Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2016.

MICHALIK, M. et al. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 4, p. 1793–1802, 2006.

NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Elétrica)–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NAM, S. R. et al. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference**, v. 2, p. 1175–1180, 2001.

NEZAMZADEH-EJIEH, S.; SADEGHKHANI, I. HIF detection in distribution networks based on Kullback-Leibler divergence. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 14, n. 1, p. 29–36, 2020.

OLIVEIRA, A. R. et al. Fault Classification in Distribution Systems Based on Fault Current Angles. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 1, p. 199–205, 2016.

PRICE, E.; EINARSSON, T. The performance of faulted phase selectors used in transmission line distance applications. **61st Annual Conference for Protective Relay Engineers**, p. 484–490, 2008.

RUSSELL, B. D. IEEE Tutorial Course: Detection of Downed Conductors on Utility Distribution Systems. **IEEE Winter Power Meeting**, v. 5, p. 6–11, 1989.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. **Fault Location on Power Networks**. [S.l.]: Springer, 2010.

SAMANTARAY, S. R.; DASH, P. K.; UPADHYAY, S. K. Adaptive Kalman filter and neural network based high impedance fault detection in power distribution networks. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 31, n. 4, p. 167–172, 2009.

SANTOS, W. C. dos. **Uma Revisão de Modelos Clássicos de Faltas de Alta Impedância para Efeito de Melhoria**. 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SANTOS, W. C. **Identificação de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição**. 2016. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

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

SILVA, C. D. L. **Estimação Fasorial Aplicada a Relés de Proteção Numéricos Utilizando os Métodos de Ajuste de Curvas e Redes Neurais Artificiais**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

SILVA, H. R. J. **Análise de uma nova proposta para identificação de faltas de**

- alta impedância em redes aéreas de distribuição.** 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.
- SOHEILI, A.; SADEH, J. Evidential reasoning based approach to high impedance fault detection in power distribution systems. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 11, n. 5, p. 1325–1336, 2017.
- SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W.; FEDIRCHUK, D. J. Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 461–470, 1994.
- 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.
- THERON, J. C. J.; PAL, A.; VARGHESE, A. Tutorial on high impedance fault detection. **71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE 2018)**, v. 2018, p. 1–23, 2018.
- ZADEH, H. K. An ANN-Based High Impedance Fault Detection Scheme: Design and Implementation. **International Journal of Emerging Electric Power Systems**, v. 4, n. 2, 2005.

APÊNDICE A – PARÂMETROS DO SISTEMA TESTE

Quadro A. 1 – Características das Conexões entre os Nós do Sistema

(continua)

Nó A	Nó B	Distância (m)	Condutor	Fases	Potência do Trafo no nó B (kVA)	Nó A	Nó B	Distância (m)	Condutor	Fases	Potência do Trafo no nó B (kVA)
1	2	88,3	P-150	ABC	-	100	102	27,7	A-336	ABC	-
2	3	220	A-02	ABC	45	102	103	92,6	A-40	ABC	75
3	4	25,3	A-02	ABC	-	103	104	168	A-02	ABC	-
4	5	127,7	A-02	ABC	45	104	105	117,5	A-02	ABC	75
4	6	121	A-02	ABC	45	104	106	32	A-02	ABC	75
2	7	131,1	P-150	ABC	75	102	107	198,7	A-336	ABC	-
7	8	126,1	P-150	ABC	-	107	108	39	A-02	ABC	112,5
8	9	200	A-02	ABC	45	107	109	716,2	A-336	ABC	-
9	10	169,9	A-02	ABC	45	109	110	9,1	A-02	ABC	30
8	11	217,1	P-150	ABC	45	109	111	85,5	A-336	ABC	-
11	12	28,1	P-150	ABC	45	111	112	13,4	A-02	ABC	15
12	13	149,2	P-150	ABC	-	111	113	54,6	A-336	ABC	-
13	14	109,7	A-02	ABC	45	113	114	132,6	A-02	ABC	45
14	15	199,1	A-02	ABC	225	113	115	141,8	A-336	ABC	-
13	16	232,7	P-150	ABC	-	115	116	13,3	A-336	ABC	30
16	17	57,6	A-02	ABC	75	115	117	60,2	A-336	ABC	-
17	18	69,1	A-02	ABC	-	117	118	51,3	A-04	ABC	75
18	19	62,6	A-02	ABC	75	117	119	324,3	A-336	ABC	-
18	20	143,5	A-02	ABC	-	119	120	357,9	A-02	ABC	225
20	21	80,8	A-02	ABC	112,5	119	121	382,4	A-336	ABC	-
20	22	187,3	A-02	ABC	-	121	122	48,4	A-02	ABC	15
22	23	34,6	A-02	ABC	75	121	123	73,8	A-336	ABC	-
22	24	85	A-02	ABC	-	123	124	23,7	A-02	ABC	150
24	25	95,3	A-02	ABC	45	123	125	326	A-336	ABC	-
24	26	32,9	A-02	ABC	45	125	126	136,6	A-02	ABC	-
26	27	36,9	A-02	ABC		126	127	22,5	A-02	ABC	300
27	28	237,8	A-02	ABC	45	126	128	315,2	A-02	ABC	-
27	29	107,4	A-02	ABC	75	128	129	34	A-02	ABC	150
29	30	38,2	A-02	ABC	-	128	130	225,9	A-02	ABC	-
30	31	109,6	A-02	ABC	45	130	131	50,3	A-02	C	10 (1Φ)
30	32	166,8	A-02	ABC	75	130	132	74,4	A-02	ABC	45
16	33	51,3	P-150	ABC	75	130	133	108,1	A-02	ABC	-
33	34	175,7	P-150	ABC	45	133	134	121,4	A-02	ABC	30
34	35	208	P-150	ABC	-	133	135	107,8	A-02	ABC	-
35	36	51	P-150	ABC	75	135	136	632,7	A-02	B	10 (1Φ)
35	37	123	P-150	ABC	150	135	137	103,7	A-02	ABC	15
37	38	44,3	P-150	ABC	-	137	138	106,6	A-02	ABC	-

Quadro A. 1 – Características das Conexões entre os Nós do Sistema

(continuação)

Nó A	Nó B	Distância (m)	Condutor	Fases	Potência do Trafo no nó B (kVA)	Nó A	Nó B	Distância (m)	Condutor	Fases	Potência do Trafo no nó B (kVA)
38	39	38,3	P-150	ABC	75	138	139	68	A-02	ABC	75
39	40	58,3	A-02	ABC	75	138	140	53,9	A-02	ABC	37,5
38	41	75,8	A-336	ABC	-	138	141	407,2	A-02	ABC	-
41	42	21,1	A-336	ABC	112,5	141	142	158	A-02	ABC	112,5
41	43	37,8	A-336	ABC	-	141	143	200,9	A-02	ABC	150
43	44	59,2	A-336	ABC	75	143	144	496,8	A-02	ABC	30
43	45	46,1	A-336	ABC	75	144	145	82,5	A-02	ABC	30
45	46	94,5	A-336	ABC	75	145	146	899,9	A-02	ABC	45
46	47	77,8	A-336	ABC	75	146	147	48,7	A-02	ABC	-
47	48	48,9	A-336	ABC	-	147	148	1303,8	A-02	A	-
48	49	99	A-40	ABC	-	148	149	429	A-02	A	-
49	50	56,4	A-02	ABC	150	149	150	83,9	A-02	A	15 (1Φ)
49	51	138,8	A-40	ABC	-	149	151	628,8	A-02	A	10 (1Φ)
51	52	107,7	A-02	ABC	45	148	152	1372,8	A-02	A	10 (1Φ)
51	53	146,4	A-02	ABC	150	152	153	303,3	A-02	A	-
53	54	323,3	A-02	ABC	112,5	153	154	167,2	A-02	A	10 (1Φ)
54	55	296,2	P-35	ABC	45	153	155	149,8	A-02	A	10 (1Φ)
51	56	28,1	A-40	ABC	-	155	156	345,1	A-02	A	10 (1Φ)
56	57	36	A-40	ABC	75	156	157	248	A-02	A	5 (1Φ)
57	58	35,1	A-40	ABC	45	157	158	236,1	A-02	A	-
58	59	28,7	A-40	ABC	112,5	158	159	164,5	A-02	A	10 (1Φ)
59	60	130,4	A-40	ABC	-	158	160	104,6	A-02	A	5 (1Φ)
60	61	209,2	A-40	ABC	75	125	161	231,5	A-336	ABC	-
60	62	72,2	A-40	ABC	-	161	162	609,5	A-336	ABC	-
62	63	7,3	A-02	ABC	112,5	162	163	12,2	A-02	ABC	-
63	64	142,3	A-04	ABC	75	163	164	41,1	A-02	ABC	112,5
60	65	197	A-40	ABC	-	163	165	134,7	A-02	ABC	-
65	66	262	A-02	ABC	-	165	166	46,4	S-02	ABC	45
66	67	42,3	A-02	ABC	75	166	167	6,1	S-02	ABC	-
66	68	137,1	A-02	ABC	112,5	167	168	41,6	A-02	B	10 (1Φ)
66	69	102,6	A-40	ABC	-	162	169	220,1	A-336	ABC	-
69	70	9,7	A-40	ABC	45	169	170	18,4	A-02	ABC	300
69	71	89	A-40	ABC	75	169	171	127,4	A-336	ABC	45
71	72	235,8	A-40	ABC	-	171	172	335,8	A-336	ABC	-
72	73	9,2	A-02	ABC	45	172	173	10,6	A-02	ABC	2000
72	74	188,7	A-40	ABC	75	172	174	558,4	A-336	ABC	-
48	75	48,2	A-40	ABC	112,5	174	175	257,5	A-02	ABC	-
75	76	43,9	A-40	ABC	-	175	176	86,6	A-02	ABC	75
76	77	19,8	A-02	ABC	30	175	177	249,9	A-02	ABC	45
77	78	94,9	A-02	ABC	-	177	178	349,1	A-02	ABC	-

Quadro A. 1 – Características das Conexões entre os Nós do Sistema

(conclusão)

Nó A	Nó B	Distância (m)	Condutor	Fases	Potência do Trafo no nó B (kVA)	Nó A	Nó B	Distância (m)	Condutor	Fases	Potência do Trafo no nó B (kVA)
78	79	30,6	A-02	ABC	30	178	179	65,1	A-02	ABC	75
79	80	169,5	A-02	ABC	150	178	180	1802	A-02	ABC	-
80	81	91	A-02	ABC	-	180	181	93,5	A-02	ABC	75
81	82	16,1	A-02	ABC	45	180	182	194,2	A-02	ABC	75
82	83	34,7	A-02	ABC	75	174	183	1629,2	A-336	ABC	-
76	84	220,1	A-40	ABC	-	183	184	30,3	A-02	ABC	225
84	85	41,3	A-40	ABC	150	183	185	217,8	A-02	ABC	-
85	86	36	A-40	ABC	-	185	186	46,8	A-02	ABC	75
86	87	21	A-02	ABC	112,5	185	187	88,1	A-02	ABC	45
84	88	84,7	A-02	ABC	-	183	188	185,7	A-02	ABC	-
88	89	53	A-02	ABC	75	188	189	680,1	A-02	ABC	-
88	90	85	A-02	ABC	-	189	190	28,6	A-02	ABC	30
90	91	76,3	A-10	ABC	75	189	191	191,2	A-02	ABC	112,5
90	92	120	A-02	ABC	45	188	192	141,1	A-336	ABC	-
48	93	68,5	A-336	ABC	-	192	193	147,5	A-02	ABC	45
93	94	19,7	A-02	ABC	300	193	194	144,1	A-02	ABC	45
93	95	40,6	A-336	ABC	-	192	195	869	A-336	ABC	75
95	96	40	A-02	ABC	112,5	195	196	2393	A-336	ABC	-
95	97	149	A-336	ABC	-	196	197	89,4	A-02	ABC	112,5
97	98	67	A-02	ABC	112,5	196	198	239,2	A-336	ABC	-
97	99	270,2	A-336	ABC	75	198	199	19,2	A-02	ABC	75
99	100	43,7	A-336	ABC	-	198	200	51,7	A-336	ABC	-
100	101	21,6	A-02	ABC	112,5	200	201	21,5	A-02	ABC	45

Fonte: O autor.

Quadro A. 2 – Parâmetros dos Condutores

Condutor	R0(Ω/m)	X0(Ω/m)	R1(Ω/m)	X1(Ω/m)
A-336	0,000365573	0,002149252	0,000189423	0,000381195
A-40	0,000478011	0,002172390	0,000301399	0,000403384
A-10	0,000780316	0,002198594	0,000604569	0,000430580
A-02	0,001139480	0,002215417	0,000963061	0,000447552
A-04	0,001706262	0,002232942	0,001530003	0,000464651
P-150	0,000407613	0,002347248	0,000231004	0,000280159
P-35	0,001149147	0,002399517	0,000971886	0,000333642
S-02	0,001132384	0,002212161	0,000962055	0,000442217

Fonte: O autor.

Quadro A. 3 – Parâmetros do Transformador da Subestação

Tensão Primária (kV)	Tensão Secundária (kV)	X0 (p.u.)	X1(p.u.)	Sbase(MVA)
69 (Delta)	13,8 (Estrela aterrada)	0,4995	0,4995	100

Fonte: O autor.

Quadro A. 4 – Parâmetros dos Transformadores Trifásicos Distribuídos ao Longo do Alimentador

Potência (kVA)	Tensão Primária (kV)	Tensão Secundária (kV)	Impedância de Dispersão	
			Z(%)	X/R
15	13,8 (Delta)	0,38 (Estrela aterrada)	3,5	3,5
30			3,5	3,5
37,5			3,5	3,5
45			3,5	3,5
75			3,5	3,5
112,5			3,5	3,5
150			4	3,5
225			4,5	3,5
300			4,5	3,5
2000			6	8

Fonte: O autor.

Quadro A. 5 – Cargas Conectadas ao Secundário dos Transformadores Trifásicos para $d = 0\%$

Potência (kVA)	Modelo de Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
		R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)
15	Y-Z	8,664	4,196167	8,664	4,196167	8,664	4,196167
30	Y-Z	4,332	2,098083	4,332	2,098083	4,332	2,098083
37,5	Y-Z	3,4656	1,678467	3,4656	1,678467	3,4656	1,678467
45	Y-Z	2,888	1,398722	2,888	1,398722	2,888	1,398722
75	Y-Z	1,7328	0,839233	1,7328	0,839233	1,7328	0,839233
112,5	Y-Z	1,1552	0,559489	1,1552	0,559489	1,1552	0,559489
150	Y-Z	0,8664	0,419617	0,8664	0,419617	0,8664	0,419617
225	Y-Z	0,5776	0,279744	0,5776	0,279744	0,5776	0,279744
300	Y-Z	0,4332	0,209808	0,4332	0,209808	0,4332	0,209808
2000	Y-Z	0,06498	0,031471	0,06498	0,031471	0,06498	0,031471

Fonte: O autor.

Quadro A. 6 – Cargas Conectadas ao Secundário dos Transformadores Trifásicos para $d = 20\%$

Potência (kVA)	Modelo de Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
		R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)
15	Y-Z	8,664	4,196167	11,552	5,594889	11,552	5,594889
30	Y-Z	4,332	2,098083	5,776	2,797444	5,776	2,797444
37,5	Y-Z	3,4656	1,678467	4,6208	2,237956	4,6208	2,237956
45	Y-Z	2,888	1,398722	3,8507	1,864963	3,850667	1,864963
75	Y-Z	1,7328	0,839233	2,3104	1,118978	2,3104	1,118978
112,5	Y-Z	1,1552	0,559489	1,5403	0,745985	1,540267	0,745985
150	Y-Z	0,8664	0,419617	1,1552	0,559489	1,1552	0,559489
225	Y-Z	0,5776	0,279744	0,770133	0,372993	0,770133	0,372993
300	Y-Z	0,4332	0,209808	0,5776	0,279744	0,5776	0,279744
2000	Y-Z	0,06498	0,031471	0,08664	0,041962	0,08664	0,041962

Fonte: O autor.

Quadro A. 7 – Cargas Conectadas ao Secundário dos Transformadores Trifásicos para $d = 40\%$

Potência (kVA)	Modelo de Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
		R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)
15	Y-Z	8,664	4,196167	8,664	4,196167	17,328	8,392333
30	Y-Z	4,332	2,098083	4,332	2,098083	8,664	4,196167
37,5	Y-Z	3,4656	1,678467	3,4656	1,678467	6,9312	3,356933
45	Y-Z	2,888	1,398722	2,888	1,398722	5,776	2,797444
75	Y-Z	1,7328	0,839233	1,7328	0,839233	3,4656	1,678467
112,5	Y-Z	1,1552	0,559489	1,1552	0,559489	2,3104	1,118978
150	Y-Z	0,8664	0,419617	0,8664	0,419617	1,7328	0,839233
225	Y-Z	0,5776	0,279744	0,5776	0,279744	1,1552	0,559489
300	Y-Z	0,4332	0,209808	0,4332	0,209808	0,8664	0,419617
2000	Y-Z	0,06498	0,031471	0,06498	0,031471	0,12996	0,062943

Fonte: O autor.

Quadro A. 8 – Parâmetros dos Transformadores Monofásicos

Potência (kVA)	Tensão Primária (kV)	Tensão Secundária (kV)	Corrente a Vazio de pico (A)	Fluxo Magnético (Wb-espira)	Resistência de Magnetização (Ω)	Impedância de Carga (modelo de carga Y-Z)	
						R(Ω)	X(Ω)
5	7,97	0,219	0,0177	29,9078	3174000	15,7527	7,6294
10			0,0355		1587000	7,87636	3,8147
15			0,0532		1058000	5,25091	2,5431

Fonte: O autor.