

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO ULISES IURINIC

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA:
UMA ABORDAGEM BASEADA NA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS
ASSOCIADOS A MODELOS NO DOMÍNIO DO TEMPO**

Porto Alegre

2016

LEONARDO ULISES IURINIC

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA:
UMA ABORDAGEM BASEADA NA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS
ASSOCIADOS A MODELOS NO DOMÍNIO DO TEMPO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia - Sistemas de Potência

Orientador: Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Iurinic, Leonardo Ulises

Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo / Leonardo Ulises Iurinic. -- 2016.

86 f.

Orientador: Arturo Suman Bretas.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Estimação de Parâmetros. 2. Falta de Alta Impedância. 3. Localização de Faltas. 4. Método de Mínimos Quadrados. I. Bretas, Arturo Suman, orient. II. Título.

LEONARDO ULISES IURINIC

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA:
UMA ABORDAGEM BASEADA NA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS
ASSOCIADOS A MODELOS NO DOMÍNIO DO TEMPO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS
Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University –
Blacksburg, EUA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes, UFSM
Doutor pela Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, Brasil

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Leomos, UFRGS,
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil.

Prof. Dr. Gustavo Dorneles Ferreira, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Daniel da Silva Gazzana, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS
Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Coordenador do PPGE: _____

Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira

Porto Alegre, Fevereiro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais e irmãos, pelo amor incondicional, pelo suporte e apoio em todos os momentos.

À Silvia Liliana Cossio, pelo apoio, pelo seu amor, companheirismo, amizade e compreensão em todos os momentos.

Ao meu filho Bruno, um dos principais mestres da minha vida, que com os seus quase três aninhos esteve presente em todas as etapas do meu doutorado.

Ao Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, meu orientador e estimulador do meu crescimento profissional e pessoal, agradeço também pela confiança depositada em mim.

Ao Prof. Dr. Renato Gonçalves Ferraz, pela sincera amizade, pelas boas conversas, pela constante e inestimável ajuda na realização deste projeto e demais trabalhos.

Aos amigos Andrés Ricardo Herrera Orozco e César Augusto Orozco Henano, por compartilhar seu tempo em conversas construtivas.

Aos todos os amigos, colegas e professores do Laboratório de Análise de Sistemas Elétricos de Potência, Aquiles Rossoni, Alex Bernsts Tronchoni, Juliana Klas, Andrés Ricardo Herrera Orozco, César Augusto Orozco Henano, Daniel da Silva Gazzana, Bibiana Maitê Petry, Roberto Chouhy Leborgne, Sérgio Braunstein, por formar parte da minha vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica desta Universidade, aos seus professores e funcionários que trabalham cada dia para elevar o nível de excelência deste programa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro.

E, finalmente, as demais pessoas que contribuíram e incentivaram de alguma forma a realização deste trabalho.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

*Vive como si fueras a morir mañana. Aprende como si fueras
a vivir siempre.*

Mahatma Gandhi

RESUMO

A detecção de um tipo particular de falta, denominado de alta impedância, tem sido há muito tempo um desafio para a engenharia de proteção. Por outro lado, se a detecção é realizada com sucesso, ações preventivas e de manutenção devem ser tomadas para evitar prejuízos potenciais. Nesse contexto, os métodos de localização de faltas assumem importante papel, pois contribuem para a rápida restauração do sistema. Entretanto, os métodos clássicos, em particular as formulações a um terminal, não consideram modelos realísticos de faltas de alta impedância na sua formulação. Este tipo de falta se caracteriza pelo contato de um condutor energizado com uma superfície de elevada resistência elétrica, em que o comportamento da tensão em função da corrente apresenta uma característica não linear. Desta forma, esta tese propõe uma nova formulação para a localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica, com medições a um terminal, que considere tal efeito. A formulação é proposta para estimar a distância da falta em linhas de distribuição utilizando o método de estimação por mínimos quadrados, desenvolvendo um modelo no domínio do tempo do sistema elétrico e um modelo de falta de alta impedância composto por diodos antiparalelos. Mediante o modelo do sistema elétrico, é possível estimar a distância da falta, juntamente com os parâmetros da falta de alta impedância, usando sinais provenientes de um terminal, como um problema de otimização. Primeiramente, não considerando o efeito capacitivo das linhas, um modelo linear no domínio do tempo é obtido e um estimador de mínimos quadrados linear é proposto. Posteriormente, considerando o efeito capacitivo das linhas, um modelo não linear no domínio do tempo é obtido e um algoritmo de descida é proposto para a estimação dos parâmetros. Os estudos de caso foram realizados no sistema de 13 barras da IEEE modelado no *Alternative Transient Program*. Em todas as condições simuladas, os resultados obtidos mostraram um desempenho similar da técnica proposta com ou sem a consideração da capacitância das linhas, sendo assim, por simplicidade, optou-se pela desconsideração da capacitância. Os resultados evidenciaram que a técnica de localização de faltas proposta não mostra diferença no seu desempenho com variações do ângulo de incidência da falta e melhora quando o carregamento do sistema diminui. O erro relacionado à estimativa da distância da falta mostra-se, em geral, superior ao erro cometido ao estimar os parâmetros da falta de alta impedância. Por outro lado, os estudos de caso mostram um grande potencial para aplicar a técnica proposta como um detector e classificador de faltas de alta impedância.

Palavras-chave: Estimação de Parâmetros. Falta de Alta Impedância. Localização de Faltas. Método de Mínimos Quadrados.

ABSTRACT

High impedance fault location has always been a challenge for protection engineering. On the other hand, if this task is successfully realized maintenance action could be performed in order to avoid potential injuries. For an effective protection scheme the high impedance fault location should be performed, but a lack of research on this area is noted. This thesis proposes a new analytical formulation for high impedance fault location in power systems. The approach is developed in time domain, considering a high impedance fault model composed by two antiparallel diodes. Using this model, the fault distance and fault parameters are estimated as a minimization problem, allowing the location of the fault using one terminal signals. Firstly, the line capacitance is not considered and a linear model in time domain is obtained. In this case, the linear least square estimator is used for parameter estimation. In a second moment, the line capacitance is considered and a non-linear model in time domain is obtained. Hence, a steepest descent based estimator is proposed in order to estimate the parameters. Studies were carried out with the IEEE 13 bus modeled in the Alternative Transient Program. In view of the test results, the non-consideration of line capacitance resulted in similar accuracy in relation to its consideration. The method also is insensitive to the fault inception instant and the reduction of system load reduces the errors related to the estimations. The error related to fault distance estimation is in general greater than the estimation of the high impedance fault parameters. On the other hand, case studies shows the great potential of the technique as a high impedance fault detector method.

Keywords: Fault Location. High Impedance Fault. Least square method. Parameter Estimation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Causas típicas de faltas em SDP: (a) árvore em contato com a linha energizada; (b) condutor caído no lado da fonte; (c) condutor caído no lado da carga.....	37
Figura 2.2 - Linha de distribuição em falta com terminal remoto passivo.....	40
Figura 2.3 - Diagrama de um sistema de distribuição de energia elétrica em falta.....	41
Figura 2.4 - Falta fase-terra na fase <i>a</i>	42
Figura 2.5 - Diagrama de Lattice que mostra o fluxo das ondas viajantes devido a uma falta em um sistema de três secções de linhas.	45
Figura 2.6 - Sistema de distribuição de energia elétrica radial.....	48
Figura 2.7 - Superfícies de níveis dos coeficientes wavelet utilizada para melhorar a estimativa da frequência característica.	49
Figura 2.8 - Trecho de linha monofásica sob falta indicada no ponto F.	51
Figura 3.1 - Característica tensão-corrente de uma FAI.....	60
Figura 3.2 - Corrente em função do tempo de uma FAI típica.....	61
Figura 3.3 - Modelo de FAI do tipo diodos antiparalelos.	63
Figura 3.4 - Modificações ao modelo de diodos antiparalelos de Emmanuel et al (1990): (a) Modelo proposto por Zamanan e Sykulski (2006); (b) Modelo utilizado por Sharaf, Sinder e Debnath (1993); (c) Modelo proposto por Sheng e Rovnyak (2004).....	63
Figura 3.5 - Modelo com interruptor controlado por TACS.	64
Figura 3.6 - Modelo de FAI proposto por Nam et al. (2001).	64
Figura 3.7 - Tensão característica em função da corrente de uma FAI modelada por Nakagomi (2006), dada em pu. Linha cheia: quando o valor absoluto da corrente de falta aumenta; linha tracejada: quando o valor absoluto da corrente de falta diminui.	65
Figura 3.8 - Parte resistiva da FAI que diminui com o tempo (URIARTE, 2003).....	66
Figura 3.9 - Algoritmo para a resolução da equação de arco no programa ATP.	68
Figura 4.1 - a) circuito de sequência positiva e negativa; b) circuito de sequência zero.	73
Figura 4.2 - Sistema de distribuição de energia elétrica com a instalação dos indicadores de faltas interconectados com um sistema <i>wireless</i>	77
Figura 4.3 - Algoritmo de LDFAI por TWD utilizando medidores localizados em vários locais do sistema.	78
Figura 5.1 - Modelo de FAI em diodos em antiparalelo.	82
Figura 5.2 - Diagrama unifilar do modelo de linha e uma falta no ponto F.....	83
Figura 5.3 - Modelo de linha de transmissão.....	84
Figura 5.4 - Modelo de linha de transmissão trifásica.....	88
Figura 5.5 - Modelo de linha de transmissão trifásica, onde i_r é a corrente residual e \hat{i}_f é a corrente estimada da falta.	92
Figura 5.6 - Ilustração da implementação do EMQ.....	95

Figura 5.7 - Fluxograma completo para a implementação do AMQL ou AMQNL.	99
Figura 6.1 - Modelo de FAI em diodos em antiparalelo.	101
Figura 6.2 - Implementação do modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990) mediante o ATPDraw.	102
Figura 6.3 - Diagrama do sistema de potência usado nas simulações: IEEE de 13 barras. ...	103
Figura 6.4 – Ilustração do intervalo em que a média das estimativas é realizada. No eixo vertical se mostra a distância da falta estimada e no eixo horizontal o transcurso do instante de aplicação do algoritmo.	108
Figura 7.1 - Corrente de falta real (superior) e estimada (inferior). Na figura inferior se ilustra a janela de móvel utilizada para aplicar os algoritmos (J1).	110
Figura 7.2 - Resultados do AMQNL para considerar a capacitância da linha.	111
Figura 7.3 - Resultados do AMQL sem considerar a capacitância da linha.	111
Figura 7.4 - Erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$	113
Figura 7.5 - Distância estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$	114
Figura 7.6 - Erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$	115
Figura 7.7 - Erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$	116
Figura 7.8 - Erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$	117
Figura 7.9 - Erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$	118
Figura 7.10 – Norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta ($Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$	119
Figura 7.11 - Erro percentual na distância estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).	120
Figura 7.12 - Erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).	120
Figura 7.13 - Erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).	121
Figura 7.14 - Erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).	121
Figura 7.15 - Erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).	121
Figura 7.16 - Norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).	122

Figura 7.17 - Média do erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.	123
Figura 7.18 - Média do erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.	123
Figura 7.19 - Média do erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.	123
Figura 7.20 - Média do erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.	124
Figura 7.21 - Média do erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.	124
Figura 7.22 - Média da norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.	124
Figura 7.23 - Média do erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.	125
Figura 7.24 - Média do erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.	125
Figura 7.25 - Média do erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.	126
Figura 7.26 - Média do erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.	126
Figura 7.27 - Média do erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.	126
Figura 7.28 - Média da norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência. .	127
Figura 7.29 - Erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.	129
Figura 7.30 - Erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.	129
Figura 7.31 - Erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.	130
Figura 7.32 - Erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.	131
Figura 7.33 - Erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio;	

linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.	131
Figura 7.34 - Diagrama do sistema IEEE de 13 barras. Os números em círculos indicam os locais dos eventos analisados.	133
Figura 7.35 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase a.	135
Figura 7.36 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para a energização de um transformador.	135
Figura 7.37 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase c.	136
Figura 7.38 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para a energização de um banco de capacitores.	137
Figura 7.39 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase b.	138
Figura 7.40 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para a energização de um ramal com carga.	138
Figura 7.41 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase b na seção 2 do sistema IEEE 13 barras.	139
Figura 7.42 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição no início da seção 2, para uma FAI na fase b na seção 2 do sistema IEEE 13 barras.	140
Figura 7.43 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição no início da seção 3, para uma FAI na fase b na seção 2 do sistema IEEE 13 barras.	140
Figura F.1 - Diagrama do sistema de potência usado nas simulações: IEEE de 13 barras.	165
Figura F.2 - Configurações modificadas das linhas do sistema de 13 barras da IEEE: (a) configuração 500; (b) configuração 505; (c) configuração 510.	166

LISTA DE QUADROS

Quadro C.1 - Algoritmo para estimação por mínimos quadrados utilizando o método de decomposição em valores singulares em linguagem Matlab.....	159
Quadro E.1 - Algoritmo para implementação de um indutor segundo o método de segunda ordem de Gear em linguagem MODELS	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 6-1 - Distâncias a partir da barra 650 em que as faltas foram simuladas.	103
Tabela 7-1 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150 Ω e ângulo de 20 graus	109
Tabela 7-2 - Variações de ângulo e magnitude da impedância de falta. Tensões de arco mantidas fixas em: $V_{Fp} = 1000$ V e $V_{Fn} = 1200$ V.	112
Tabela 7-3 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150 Ω e ângulo de 20 graus	120
Tabela 7-4 - Instantes de incidência das faltas de alta impedância.	122
Tabela 7-5 - Variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância utilizadas para avaliar a influência do instante de incidência da falta.	122
Tabela 7-6 - Variações aleatórias de faltas de alta impedância utilizadas para analisar a influência do carregamento do sistema.	125
Tabela 7-7 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150 Ω e ângulo de 20 graus	127
Tabela 7-8 - Trinta faltas de alta impedância geradas de forma aleatória.	128
Tabela 7-9 - Desempenho global da técnica proposta.....	132
Tabela 7-10 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150 Ω e ângulo de 20 graus	133
Tabela F.1 - Condutores utilizados no sistema IEEE de 13 barras.....	165
Tabela F.2 - Código para a combinação entre configuração de linha e condutor.	166
Tabela F.3 - Conexões entre os nós do sistema de 13 barras da IEEE modificado.....	167
Tabela F.4 - Cargas conectadas no sistema de 13 barras da IEEE modificado.....	168
Tabela F.5 - Valores da resistência e reatância indutiva conectada entra cada fase de cada nó do sistema de 13 barras da IEEE modificado.....	169
Tabela F.6 - Dados gerais dos transformadores.	169
Tabela F.7 - Parâmetros para modelagem numérica no ATP: transformador da subestação de distribuição (T1).	169
Tabela F.8 - Parâmetros para modelagem numérica no ATP: transformador de distribuição (T2).	170

LISTA DE ABREVIATURAS

AMQL	Algoritmo de Mínimos Quadrados Linear
AMQNL	Algoritmo de Mínimos Quadrados Não Linear
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EMQ	Estimador de Mínimos Quadrados
FAI	Falta de Alta Impedância
GPS	<i>Global Positioning System</i>
LDF	Localização de Falta
LDFAI	Localização de Falta de Alta Impedância
RDP	Registrador Digital de Perturbação
REI	Redes Elétricas Inteligentes
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SDP	Sistema de Distribuição Primária
SED	Subestação de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TWD	Transformada Wavelet Discreta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	MOTIVAÇÃO	32
1.2	OBJETIVOS DA TESE.....	32
1.3	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	33
1.4	ESTRUTURA DA TESE	33
2	FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E A SUA LOCALIZAÇÃO	35
2.1	CAUSAS E TIPOS DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA	35
2.2	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA: FALTA COMO RESISTÊNCIA LINEAR	38
2.2.1	Método baseado na impedância aparente	39
2.2.2	Método baseado nas ondas viajantes	44
2.2.3	Método híbrido	50
2.3	LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS	50
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
3	CARACTERÍSTICAS E MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA .	55
3.1	CARACTERÍSTICAS DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	55
3.1.1	Características físicas associadas às faltas devido à queda de condutores energizados	55
3.1.2	Características físicas associadas às faltas por contato de árvores com a linha	58
3.1.3	Características particulares dos sinais elétricos devido à presença de faltas de alta impedância.....	59
3.2	MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	62
3.2.1	Modelos de diodos antiparalelos	62
3.2.2	Modelo baseado na relação característica entre tensão e corrente de falta.....	64
3.2.3	Modelos baseados nas equações do arco elétrico	66
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
4	DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA	69

4.1	O PROBLEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA	69
4.1.1	Fabricante General Electric (GE).....	71
4.1.2	Fabricante Asea Brown Boveri (ABB)	71
4.1.3	Fabricante Schwitzer Engineering Laboratory (SEL).....	71
4.2	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	71
4.2.1	Método de Djuric, Radojevic e Terzija (1999)	72
4.2.2	Método de Bretas et. al. (2006).....	75
4.2.3	Método de Elkalashy et. al. (2008)	76
4.2.4	Método de Zhou et. al. (2011; 2012).....	78
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5	MÉTODO PROPOSTO PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DA FALTA ...	81
5.1	FORMULAÇÃO PROPOSTA PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DA FALTA	81
5.1.1	Extensão da formulação proposta para linhas trifásicas.....	88
5.2	IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA.....	92
5.2.1	Estimação da corrente de falta	92
5.2.2	Estimação numéricas das derivadas	93
5.2.3	Implementação do estimador de mínimos quadrados	94
5.2.4	Cálculo do limiar definido pela corrente de falta.....	94
5.2.5	Solução Considerando a Capacitância da Linha	96
5.3	FLUXOGRAMA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA.....	98
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6	DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO	101
6.1	DESCRIÇÃO DA MODELAGEM DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	101
6.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA SIMULADO	102
6.3	DESCRIÇÕES DOS ESTUDOS DE CASO	104
6.3.1	Influência da consideração da capacitância no algoritmo.....	105
6.3.2	Análise de sensibilidade	105
6.3.3	Análise da precisão global do algoritmo	106
6.3.4	Avaliação qualitativa da técnica proposta como potencial do método para detecção e classificação de FAI	106

6.4	PARÂMETROS DO ALGORITMO UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE CASO ...	106
6.4.1	Estimação da corrente de falta	106
6.4.2	Estimação das derivadas	107
6.4.3	Tamanho das janelas e limiar para seleção de amostras	107
6.4.4	Obtenção da estimativa final	107
6.4.5	Frequência de amostragem	108
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ESTUDOS DE CASO	109
7.1	INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA CAPACITÂNCIA.....	109
7.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	112
7.2.1	Efeito da variação dos parâmetros da FAI.....	112
7.2.2	Influência do ângulo de incidência da falta	122
7.2.3	Influência da variação do carregamento do sistema	125
7.3	ANÁLISE DA PRECISÃO GLOBAL.....	127
7.4	AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA TÉCNICA PROPOSTA COMO MÉTODO PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	132
7.4.1	Discriminação entre energização de um transformador e uma FAI	134
7.4.2	Discriminação entre energização de um capacitor e uma FAI	136
7.4.3	Discriminação entre energização de uma linha com carga e uma FAI.....	137
7.4.4	Localização da seção em falta mediante monitoramento distribuído	139
7.5	ANÁLISE GERAL E CONSIDERAÇÕES FINAIS	141
7.5.1	Comparação entre os algoritmos de mínimos quadrados linear (AMQL) e não linear (AMQNL).....	141
7.5.2	Estimativa da distância da falta	141
7.5.3	Estimativa dos parâmetros da falta de alta impedância	142
7.5.4	Avaliação qualitativa da proposta como método de detecção e classificação de faltas de alta impedância	142
8	CONCLUSÕES.....	145
8.1	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	146
	REFERÊNCIAS	149
	APÊNDICE A: ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS LINEARES.....	157

APÊNDICE B: ALGORITMO PARA ESTIMAÇÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES	159
APÊNDICE C: IDENTIDADES PARA O CÁLCULO DO GRADIENTE E DA MATRIZ HESSIANANA	161
APÊNDICE D: MODELAGEM DE UM INDUTOR VIA MODELS.....	163
APÊNDICE E: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE 13 BARRAS DA IEEE MODIFICADO.....	165
E.1 CONFIGURAÇÕES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	165
E.2 CARREGAMENTO DO SISTEMA DE POTÊNCIA.....	168
E.3 DADOS DOS TRANSFORMADORES.....	169
APÊNDICE F: DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES	171

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) encontram-se constantemente sujeitos a condições que possibilitam a ocorrência de faltas¹. Estas faltas comumente provocam um aumento substancial na corrente fornecida ao sistema que, em geral, pode ser detectado por relés convencionais de sobrecorrente. Já uma Falta de Alta Impedância (FAI), consiste em um tipo particular de falta, caracterizada pelo contato de um condutor energizado com uma superfície de elevada resistência elétrica, que resulta em correntes pouco significativas para a atuação dos dispositivos de proteção por sobrecorrente (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996) e uma característica não linear da tensão em função da corrente. A maioria das FAI ocorre em sistemas elétricos com tensões menores ou iguais a 15 kV. Os problemas relacionados à ocorrência de FAI são menores em sistemas elétricos com níveis de tensão superiores a 25 kV, mas podem ocorrer igualmente nesses níveis (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996). Por esta razão, o escopo do presente trabalho é dirigido aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), particularmente aos Sistemas de Distribuição Primária (SDP) ou de Média Tensão (MT) aéreos, cujos níveis de tensão no Brasil vão de 13,8 kV a 34,5 kV (KAGAN; RABIONO DE OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

A detecção de uma FAI não pode ser realizada pelo sistema convencional de proteção baseado na sobrecorrente (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996). Deste modo, é impossível isolar a zona em falta do SEP, resultando em uma condição de grande risco de eletrocussão para seres vivos ou de incêndio para estruturas próximas. Somado a isto, existe ainda a possibilidade de sobretensões quando uma impedância elevada se conecta acidentalmente a terra em sistemas não aterrados, o qual pode exigir demasiadamente da isolamento dos dispositivos e componentes do sistema (SHORT, 2003). Devido às características de alta impedância destas faltas, são requeridas estratégias diferentes da abordagem clássica por sobrecorrente para sua detecção. Este problema foi estudado ao longo de vários anos com o objetivo de encontrar características confiáveis nos sinais de tensão e corrente que tornem possível a detecção de tais faltas (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996). Assim, foram propostas várias metodologias para a detecção de FAI (SEDIGHIZADEH; REZAZADEH; ELKALASHY, 2010) e inclusive equipamentos comerciais de empresas como

¹ A palavra falta em português significa a ausência ou privação de algo (HOUAISS, 2009). Entretanto, dentro do contexto da engenharia elétrica, esta palavra é utilizada para denominar qualquer falha ou defeito no sistema elétrico de potência. Como na maioria das vezes as falhas e defeitos se encontram associadas a curtos-circuitos, a palavra falta é utilizada como termo geral para dar referência a um curto-circuito.

General Electric (GE), Asea Brown Boveri (ABB) e Schweitzer Engineering Laboratory (SEL) (PATTERSON et al., 1994; STOUPIS et al., 2004; HOU, 2007). Apesar do longo histórico relacionado ao desenvolvimento de técnicas para detecção de FAI, ainda não existe uma capaz de detectar com total segurança todas as ocorrências deste tipo de defeito (SEDIGHIZADEH; REZAZADEH; ELKALASHY, 2010). Consequentemente, novos trabalhos continuam sendo desenvolvidos mediante o uso de novas ferramentas matemáticas e técnicas de processamento digital de sinais, como por exemplo, a morfologia matemática (GAUTAM; BRAHMA, 2013).

Se uma falta foi detectada por algum equipamento de proteção do SEP, a ação natural consiste em localizar o ponto ou zona em que esta se encontra para assim proceder o reparo. Devido à natureza altamente ramificada dos SDP, a Localização De Faltas (LDF) é realizada utilizando-se qualquer informação possível. Assim, dados sobre a atuação das proteções, reclamações de clientes ou inclusive observações audiovisuais são indicadores comuns do local da falta. Na maioria dos casos a obtenção destas informações é um processo lento e pouco confiável, sendo preferível a utilização de grandezas elétricas medidas para estimar o possível local em que a falta se encontra. Dentro de um contexto puramente técnico, a instalação de sistemas de aquisição de sinais sincronizados em todos os nós do SDP consiste na solução mais simples, como se observa em (ELKALASHY et al., 2008). Este representa o cenário ideal, em que o SDP é constantemente monitorado por um sistema telecomunicado com uma estrutura similar a um sistema nervoso humano, onde existe um detector de FAI em cada início de ramal. Em contrapartida, a medição de sinais de tensão e corrente em todos os nós do sistema implica um aumento considerável na transmissão, armazenamento de dados e grandes custos de instalação e manutenção que dificilmente são justificados em nível de SDP. Por esta razão é desejável o desenvolvimento de técnicas capazes de localizar faltas com medições na menor quantidade possível de terminais, idealmente com medições realizadas apenas na Subestação de Distribuição (SED). Neste contexto, o elemento de proteção deve ser capaz de estimar uma distância provável para o local da FAI.

O caso ideal se apresenta como um algoritmo para LDF baseado em medições realizadas apenas na SED. A tendência neste contexto consiste em utilizar o método da impedância aparente para estimar uma distância e múltiplos locais possíveis para a falta, e a utilização de técnicas de altas frequências para definir uma probabilidade de ocorrência a cada ponto (GAZZANA et al., 2014). Até o momento, esta abordagem é restrita somente a faltas lineares, resistivas e de baixa impedância. Em contrapartida, no mundo inteiro existe um crescente interesse pelo conceito das Redes Elétricas Inteligentes (REI), ou *smart grids*, (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013). Este novo paradigma é baseado na monitoração digital de

sinais de diferentes grandezas elétricas, incluindo a tensão e corrente, em diversos pontos do SDP. Tais sinais são transmitidos e concentrados em centros específicos, possibilitando o desenvolvimento e implementação de novos métodos para LDF inteligentes. Como exemplo mais recente, têm-se os métodos para LDF baseados em multiagentes (ERIKSSON et al., 2015; KASHYAP et al., 2015). Contudo, existe um crescente interesse pelo conceito de redes inteligentes no Brasil, como demonstrado pela implementação de vários projetos piloto (DI SANTO et al., 2015), salientando o interesse pelo conceito de detecção e localização de faltas em conjunto com algoritmos de reconfiguração automática do sistema (*self healing*) (MARTINS et al., 2014).

Atualmente, já existem publicações e protótipos de sistemas automáticos instalados para Localização de Faltas de Alta Impedância (LDFAI) em SDEE (ELKALASHY et al., 2008). Entretanto, estes precisam de medições em vários pontos do SDEE, ligados entre si por canais de informação devidamente sincronizados, o qual eleva os custos e a complexidade dos processos para a LDFAI. Os métodos baseados em um terminal para LDFAI se mostram escassos na literatura. Um destes é o proposto por Bretas et al. (2006) baseado na utilização de inteligência artificial, no entanto esta abordagem requer uma modelagem rigorosa do sistema elétrico e da FAI, bem como um exaustivo treinamento mediante simulações. Ainda, o método deve ser treinado novamente para qualquer mudança na topologia do SDEE, ação comum que se realiza para distribuir corretamente o carregamento, expandir o sistema e realizar manutenção. Por esta razão, é interessante dispor de um método generalista que não precise de treinamentos prévios. Para isto, é necessário considerar a característica típica de uma FAI que consiste em um comportamento não linear da tensão em função da corrente, o qual invalida os métodos clássicos para LDF a um terminal tanto em linhas de transmissão quanto em SDEE. Por este motivo, antes de desenvolver uma metodologia completa e integrada para LDFAI em SDEE, é necessário conceber equações e bases matemáticas para a estimação da distância da falta, considerando FAI. Neste sentido, até o momento, identificou-se na literatura apenas um método de LDFAI a um terminal, mas unicamente para linhas de transmissão, altas tensões e sem ramificações (DJURIĆ; RADOJEVIĆ; TERZIJA, 1999). Esta proposta utiliza um modelo simplificado para representar uma falta de arco e realiza o equacionamento sob as componentes simétricas, abordagem não adequada para linhas típicas nos SDEE.

1.1 MOTIVAÇÃO

As causas mais gerais de FAI são o contato de árvores com os condutores energizados ou o rompimento e queda destes no solo. Do ponto de vista técnico-social, a queda de condutores energizados ou o contato destes com árvores ou estruturas, resulta em dois importantes aspectos: o econômico, como resultado de litígios de alto custo decorrentes dos danos causados às propriedades; o de segurança pública, devido ao risco que tal evento pode trazer para a vida de seres vivos. Por este motivo, a LDFAI trata de um problema real, de grande interesse para as concessionárias e para a sociedade e que apresenta uma carência muito grande de pesquisas relacionadas ao tema. Apresentado o panorama que envolve os problemas relacionados às FAI em SDP, a seguir será apresentada uma lista concisa dos objetivos que se pretende atingir com a realização desta Tese de Doutorado, bem como as justificativas para a realização deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS DA TESE

Considerando as limitações dos atuais métodos para LDFAI em SDP que atualmente compõem o estado da arte, propõe-se atender os seguintes objetivos no desenvolvimento da tese de doutorado:

- desenvolver equações que incorporem um modelo de FAI característico dos SDP, considerando a disponibilidade de sinais digitais de tensão e corrente em um terminal, visando estimar a distância da falta em uma linha de distribuição com fluxo de potência unidirecional;
- considerar, na formulação proposta, o emprego de componentes de fase ao invés das simplificações usuais para a utilização de componentes simétricas;
- considerar, na formulação proposta, o efeito da capacitância da linha de transmissão;
- considerar os aspectos técnicos relacionados com a implementação numérica do equacionamento proposto, tais como: a estimação da corrente de falta; a estimação de derivadas; a resolução da equação para LDFAI considerando a capacitância da linha de transmissão e o tratamento de problemas numéricos;
- analisar o desempenho da técnica proposta para LDFAI em relação à variação dos parâmetros da FAI;
- analisar a capacidade da técnica proposta para LDFAI como técnica para detecção e classificação de FAI.

1.3 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

As contribuições científicas apresentadas nesta Tese começam pela formulação matemática de equações para LDFAI, com medições de tensão e corrente em um terminal, considerando um modelo de FAI mais próximo à realidade em relação ao estado da arte. Esta formulação é desenvolvida em componentes de fase para permitir a consideração adequada de linhas de transmissão desequilibradas. Ainda, na formulação proposta é considerado o efeito capacitivo das linhas de transmissão, derivando na necessidade de resolver um sistema de equações não linear. A solução deste sistema de equações é proposta mediante a utilização do método iterativo de Newton, para o qual foram deduzidas as equações apresentadas no Apêndice C. Além disso, na Tese são analisados e resolvidos os aspectos fundamentais para a implementação da técnica proposta para LDFAI, como a estimação da corrente de falta, a estimação das derivadas dos sinais em função do tempo e a solução de problemas numéricos mediante a teoria de decomposição em valores singulares. Finalmente, a técnica proposta para LDFAI é comparada com outros eventos possíveis no SEP, como a energização de cargas, transformadores e bancos de capacitores. Tal comparação permite conhecer o potencial da formulação proposta como um método para detecção e classificação de FAI.

Além das contribuições relacionadas especificamente com o tópico da LDFAI, foram resolvidos importantes problemas relacionados à metodologia para simulação e validação da técnica proposta. Estas contribuições são: o desenvolvimento de um modelo de indutor que permitiu eliminar problemas de oscilação numérica associados ao modelo de FAI considerado e um programa especializado para realizar simulações de maneira automática. Tal programa permitiu realizar um estudo de caso composto por 900 simulações, permitindo avaliar o desempenho da proposta em um contexto global.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho está estruturado em duas partes: a revisão bibliográfica está distribuída nos Capítulos 2, 3 e 4 e a formulação proposta, estudos de caso e discussões se encontram nos Capítulos restantes, conforme descreve-se a seguir:

- no Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre LDF em SDEE baseadas em medições a um terminal. A revisão abrange dois métodos considerados como consolidados, o da impedância aparente e o das ondas viajantes. Ainda, é realizada uma análise geral dos métodos para LDF para mostrar que estes não são válidos para LDFAI;

- o Capítulo 3 reúne uma série de trabalhos relevantes baseados em resultados experimentais e análises matemáticas, visando caracterizar o comportamento físico das FAI. A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica dos modelos matemáticos concebidos para simular as FAI em programas dedicados à resolução de circuitos elétricos no domínio do tempo;
- no Capítulo 4 é apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos desenvolvidos especificamente para LDFAI. Mostra-se a falta de generalização para resolver este problema e a escassez de trabalhos disponíveis na literatura;
- no Capítulo 5 é apresentada a contribuição ao estado da arte em relação à LDFAI. Neste Capítulo é demonstrado o equacionamento proposto para estimar os parâmetros do modelo escolhido e, simultaneamente, estimar a distância da falta. Por fim, é apresentada a maneira proposta para implementar o algoritmo de LDFAI;
- o Capítulo 6 descreve o sistema de potência simulado, modelos e todos os estudos de casos simulados;
- no Capítulo 7 são apresentadas os resultados e as discussões dos estudos de casos;
- o Capítulo 8 apresenta as conclusões finais deste trabalho.
- no Apêndice A é apresentado um resumo sobre o estimador de mínimos quadrados;
- o Apêndice B descreve o código para implementar o estimador de mínimos quadrados mediante a teoria de decomposição em valores singulares;
- o Apêndice C apresenta as identidades matemáticas utilizadas para o desenvolvimento da formulação proposta;
- no Apêndice D é apresentado o código para a simulação de um indutor mediante a técnica de integração de segunda ordem de Gear, utilizando a linguagem MODELS;
- o Apêndice E apresenta em detalhes o sistema da IEEE de 13 barras modificado, utilizado para realizar as simulações e os testes;
- no Apêndice F é descrita a metodologia implementada para simular e analisar os estudos de caso de forma automática.

2 FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E A SUA LOCALIZAÇÃO

As faltas são eventos que, em geral, resultam em interrupções de energia elétrica e danos aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, gerando inconveniências e perdas econômicas tanto para as concessionárias de energia elétrica como para os consumidores. Por estas razões, o estudo das faltas e a forma de proteger o sistema perante o acontecimento das mesmas, a muito tempo é um assunto de grande interesse para a comunidade científica. Além de resguardar os sistemas de energia dos efeitos negativos de uma falta, é fundamental localizar rapidamente o ponto em que a falha se encontra, permitindo, desta forma, que as equipes de manutenção possam corrigir o problema. É por isso que ao longo da história têm sido desenvolvidos distintos métodos e técnicas para a LDF. Sendo assim, o presente Capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto, começando com a exposição das causas e tipos de faltas em SDP, particularmente as FAI. A seguir, mostra-se de forma cronológica a evolução dos principais métodos para LDF em SDP, o método baseado na impedância aparente e o método baseado nas ondas viajantes geradas pela falta. Apresenta-se também o método híbrido, que combina as duas metodologias anteriores em um único processo de LDF. Por último, realiza-se uma análise global dos métodos citados para LDF sobre os motivos pelos quais estes não são viáveis de serem aplicados no caso da consideração de FAI.

2.1 CAUSAS E TIPOS DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA

Existem inúmeras formas em que as faltas podem acontecer em um SDP. As faltas se dão pela ação de solicitações extremas sobre os componentes do sistema elétrico e podem originar-se de diversas fontes, tais como ventos de tormenta, choques de veículos em postes, sobretensões devido a raios, queda de árvores ou galhos sobre os condutores e incêndios próximos à rede elétrica. O impacto negativo destas forças aumenta se os equipamentos/dispositivos da rede elétrica se encontram em um estado deteriorado, incrementando assim a probabilidade de falha. Outras causas podem ser o contato acidental de seres vivos com partes energizadas do sistema, atos de vandalismo ou manobras erradas por parte dos operários. Independentemente das causas de uma falta, estas sempre ocasionam prejuízos à concessionária e condições inseguras à comunidade.

As faltas podem estar constituídas de conexões acidentais entre fases, fases e neutro ou fases e terra, sendo a magnitude da corrente de falta limitada unicamente pela impedância do sistema e pela impedância de falta. A impedância do sistema está composta pelas impedâncias

das linhas e transformadores à montante do ponto da falta, em direção à fonte de energia e pela impedância do solo, no caso deste estar envolvido. Por outro lado, a impedância da falta constitui o caminho elétrico que interconecta as fases, fases e terra ou neutro no local da falta (SHORT, 2003). De acordo com o comportamento desta impedância de falta, a mesma pode ser classificada como de baixa ou de alta impedância. Uma falta de baixa impedância gera um aumento substancial da corrente no sistema, por conseguinte pode ser detectada pelo sistema de proteção convencional, geralmente constituído por relés de sobrecorrente. No entanto, uma FAI é constituída por uma impedância suficientemente elevada capaz de limitar a corrente de falta dentro de uma zona não protegida pela proteção por sobrecorrente (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996; SULTAN; FEDIRCHUK; SWIFT, 1994).

Neste ponto é importante salientar que em todos os casos de falta, a sua impedância possui um comportamento principalmente resistivo² devido à existência de um arco elétrico (SHORT, 2003). No caso de faltas permanentes de baixa impedância, uma suposição válida e consagrada na comunidade científica é a de atribuir à resistência de falta um comportamento linear. Se a falta for temporária, este comportamento se afasta da linearidade devido à existência predominante de um arco de alta corrente (DJURIC; TERZIJA, 1995). Entretanto, por definição, esta falta continua sendo de baixa impedância por poder ser detectada mediante relés de sobrecorrente. Pelo contrario, uma FAI possui sempre um comportamento resistivo não linear, inerente das suas características físicas. Estas características serão explicadas com detalhe no Capítulo 3 deste trabalho.

As faltas podem ser identificadas nos principais dispositivos de um SDP, tais como os transformadores de distribuição, reguladores de tensão, capacitores ou linhas de transmissão. Não obstante, as linhas que conectam os diferentes nós para formar o SDP abrangem uma grande superfície terrestre e se encontram diretamente expostas às severidades de intempéries. Por estas razões, as linhas possuem uma alta probabilidade de serem submetidas a uma falta, sendo este o foco deste trabalho. Para dirigir a atenção em casos concretos e comuns em SDP, onde geralmente são produzidas às FAI, salientam-se os seguintes cenários possíveis:

- a) Contato de um galho de árvore em um condutor energizado: neste caso a linha continua transmitindo energia elétrica, no entanto, existe uma impedância acidental que conecta uma ou mais fases a terra ou entre fases sem terra, como mostra a Figura 2.1a. Esta situação provoca arcos elétricos cuja permanência no tempo pode ocasionar incêndios e piorar a situação;

² A tensão e a corrente passam por zero ao mesmo tempo (DJURIC; TERZIJA, 1995).

- b) Rompimento de condutores e contato destes com o solo no lado da fonte de energia do sistema: neste caso um ou mais condutores de fase caem no solo como mostra a Figura 2.1b, a fonte alimenta a falta de forma direta e a corrente é limitada pela impedância da falta;
- c) Rompimento de condutores e contato destes com o solo no lado da carga: um ou mais condutores de fase caem no solo como mostra a Figura 2.1c. Neste caso a corrente de falta vai depender da indução entre a fase faltosa e a corrente nas outras fases, o efeito capacitivo da linha ou o carregamento de algum transformador à jusante.

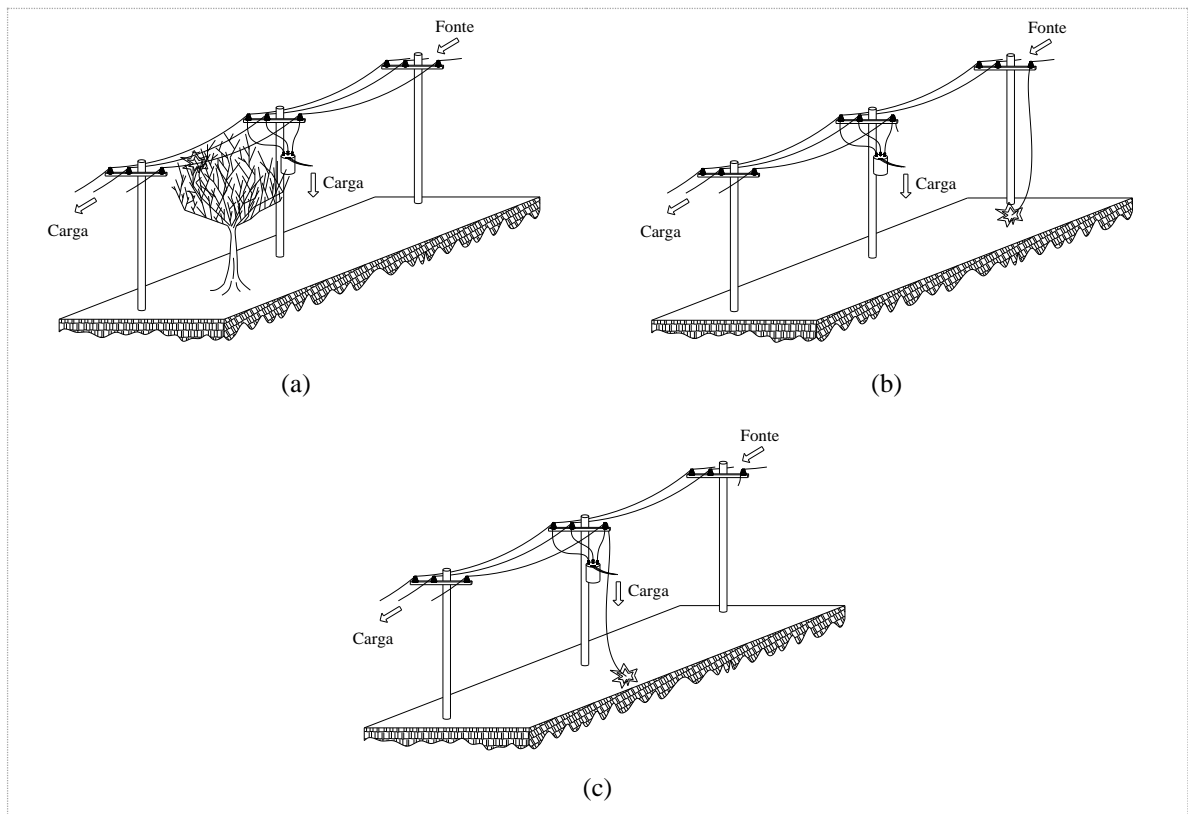


Figura 2.1 - Causas típicas de falhas em SDP: (a) árvore em contato com a linha energizada; (b) condutor caído no lado da fonte; (c) condutor caído no lado da carga.

Fonte: O autor (2016).

Efetivamente podem acontecer outras situações ou combinações entre os eventos acima mencionados. No entanto, os casos “b” e “c” podem ser considerados como os mais perigosos para os seres vivos pelo risco de contato direto. O risco associado ao caso “a” pode ser mais ou menos fatal segundo a resistividade da árvore ou elemento em contato.

2.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA: FALTA COMO RESISTÊNCIA LINEAR

As metodologias para localizar faltas são fundamentais para as equipes encarregadas da manutenção, pois estas devem realizar sua tarefa minimizando os inconvenientes causados aos consumidores de energia e minimizando as perdas econômicas da concessionária. A técnica de LDF é selecionada de acordo com diversos fatores tais como: o tempo de localização, precisão e robustez do método, o custo e requerimentos de manutenção associados aos dispositivos e habilidades requeridas pelo operador responsável. Por estas razões, para a LDF em SEP, são utilizados vários artifícios no desenvolvimento de técnicas adequadas às diferentes necessidades. Este assunto não é novo, em referências antigas como (AIEE COMMITTEE REPORT, 1955; STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957) é possível visualizar um panorama geral dos métodos utilizados desde o surgimento dos SEP. Nesses trabalhos é salientada a inspeção visual como a forma mais básica para localizar faltas. Entretanto, a velocidade e precisão obtidas com este método são razoáveis apenas para sistemas pequenos e acessíveis, podendo ser necessárias horas e até dias, considerando a influência das condições climáticas e o custo associado à equipe de manutenção.

Localizar uma falta dentro de uma rede de distribuição apresenta novos desafios em comparação a linhas de transmissão. O segundo caso pode ser reduzido a um problema unidimensional, em que as tensões e correntes monitoradas em um ou dois terminais são convertidos em um único número que representa a distância até a falta. No entanto, os sistemas de distribuição se constituem, geralmente, por uma estrutura radial³, com diversos tipos de configurações de condutores, ramificações, cargas distribuídas e concentradas com comportamento dinâmico. Sendo assim, nestes sistemas, a estimativa da distância da falta, em relação à Subestação de Distribuição de Energia (SDE), resulta em mais de um local provável de falta, denominado múltiplas estimativas de falta. A forma de calcular esta distância levando em consideração as ramificações e o comportamento variável e diverso das cargas, bem como a forma de resolver o problema das múltiplas estimativas, é o que individualiza as diferentes técnicas para LDF nos SDEE. Deste modo, é apresentada uma revisão bibliográfica de forma cronológica, que abrange uma seleção de técnicas para LDF em SDEE: o método baseado na impedância aparente, altas frequências produzidas por ondas viajantes e uma combinação de ambos.

³ Este paradigma está mudando com a utilização cada vez mais incentivada de geração distribuída no nível de distribuição. Neste caso, os sistemas de distribuição deixam de ser partes passivas do sistema para serem também parte ativa do mesmo.

2.2.1 Método baseado na impedância aparente

O método baseado na impedância aparente consiste em calcular a impedância vista desde um ou mais terminais do sistema, por meio das medições dos fasores de tensão e corrente na frequência fundamental do sistema de potência. A relação entre esta impedância vista (impedância aparente) e a impedância própria da linha de transmissão permite estimar a distância em que a falta se encontra. O principal inconveniente desta ideia está no fato de que a impedância aparente se baseia na estimativa da resistência e da corrente de falta, as quais são desconhecidas. A corrente de falta pode ser derivada mediante dois fatores complexos que dependem da configuração do sistema e o fluxo de potência neste: o fator de distribuição de corrente⁴ e o fator de carga⁵. No caso particular em que o argumento destes dois fatores é zero, o erro que os mesmos representam pode ser eliminado pela extração da parte imaginária da impedância aparente. Esta abordagem é conhecida como o método da reatância e se utiliza popularmente nos relés de proteção por distância para linhas de transmissão (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2014)

A partir da década de 1980, os trabalhos para LDF tanto em linhas de transmissão quanto em SDEE foram fortemente impulsionados graças aos trabalhos pioneiros de Takagi et al. (1981, 1982), permitindo a popularização deste método dentro da comunidade de pesquisadores. A técnica de Takagi et al. (1982) foi concebida para linhas de transmissão como uma forma de melhorar o método da reatância. Entretanto, a maneira de abordar o problema para linhas curtas e a proposta inovadora de utilizar um algoritmo inteiramente digital, consolidou os alicerces para outros métodos específicos para SDEE. Usando o teorema da superposição, o circuito em falta pode ser decomposto em duas partes: a rede pré-falta e a puramente faltosa (TAKAGI et al., 1981). Com esta decomposição é possível conceber uma única equação que relaciona a distância da falta com as tensões e correntes durante o período em falta e o período pré-falta (TAKAGI et al., 1981). Desta forma é possível eliminar a influência do fator de carga, mas a equação da distância continua com três incógnitas: a distância da falta, a resistência de falta e a corrente de falta. A resistência de falta pode ser eliminada pela consideração de apenas a parte imaginária da equação que relaciona a variável

⁴ O fator de distribuição é a relação entre a corrente que deriva exclusivamente na falta, injetada desde a barra local, e a corrente total de falta. Este fator é um número complexo que depende da distância da falta, impedâncias equivalentes de Thevenin nas barras e impedância da linha (desconsiderando a capacitância). O argumento deste número vale zero se o ângulo de todas as impedâncias é igual (KIM, 2010).

⁵ Durante a ocorrência de uma falta, o fator de carga é a relação entre a corrente total injetada desde a barra local (corrente que alimenta a falta e a carga) e a corrente que se deriva exclusivamente na falta, injetada desde a barra local (KIM, 2010).

da distância da falta. Se o argumento do fator de distribuição de corrente é nulo, a corrente de falta também é eliminada da equação. Finalmente, ao considerar uma linha de transmissão curta e corrente capacitiva desprezível, a distância pode ser facilmente isolada para chegar a uma equação explícita. As relações obtidas por Takagi et al. (1982) considera em primeiro lugar um circuito monofásico, cuja extensão para um sistema trifásico resulta em uma expressão para faltas fase-terra e outra para faltas fase-fase, fase-fase-terra e trifásica. Trabalhos como os de Schweitzer (1983) mostram que o método de Takagi et al. (1982) é muito sensível ao ângulo do fator de distribuição, previamente considerado como constante e igual a zero. Para linhas com alimentação a dois terminais, este ângulo varia de acordo com o local da falta, impedância da linha de transmissão e impedâncias equivalentes nos terminais da linha (SCHWEITZER, 1983), razão pela qual Schweitzer (1983) apresenta algumas formas de estimar o ângulo do fator de distribuição e melhorar o desempenho do método de Takagi et al. (1982).

Já, a abordagem de Srinivisan e St-Jaques (1989) apresenta um grande avanço em relação à proposta de Takagi et al. (1982) por considerar o ângulo do fator de distribuição implícito no equacionamento. Esta abordagem considera um terminal remoto passivo, como é mostrado na Figura 2.2.

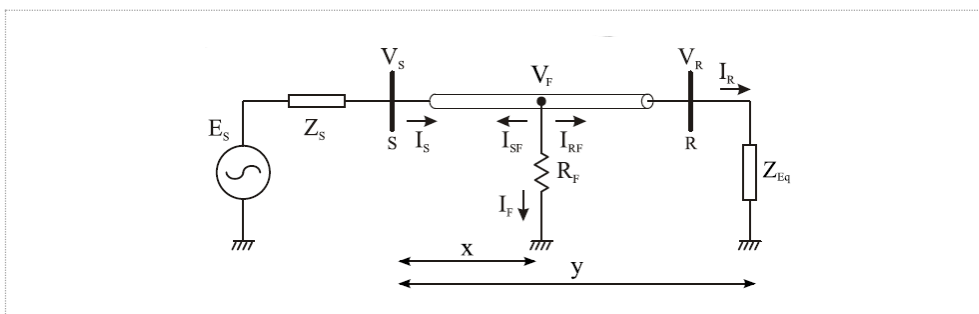


Figura 2.2 - Linha de distribuição em falta com terminal remoto passivo.
Fonte: (SRINIVASAN; ST-JACQUES, 1989) .

O trabalho foi desenvolvido para um sistema radial com possibilidade de cargas intermediárias, cujo modelo considera a possibilidade de comportamentos em impedância constante, corrente constante, potência constante ou combinações destes (modelo ZIP). Ainda, apresenta um algoritmo iterativo para LDF em linhas longas, considerando o efeito capacitivo e um conjunto de equações simplificadas para linhas curtas. Nestas últimas, a distância aparece de forma explícita, eliminando assim a necessidade de um algoritmo iterativo. Porém, na verdade, ao se realizar certas simplificações, a capacitância da linha não é considerada. Apesar de ser uma proposta elaborada e generalista, esta se baseia na teoria das componentes simétricas, o que pode resultar em erros consideráveis quando aplicado a sistemas com linhas assimétricas.

Considerando cargas intermediárias na linha, outro problema a ser resolvido é o de estimar em qual secção está localizada a falta. Neste caso, a proposta de Srinivisan e St-Jaques (1989) consiste em estimar a distância da falta para cada secção do alimentador considerando toda a carga concentrada na barra à jusante. Para isto, as tensões e correntes são estimadas nos outros nós utilizando as equações hiperbólicas para linhas de transmissão e o algoritmo de LDF é repetido. Como consequência disto pode surgir várias estimativas para o local da falta se a topologia do SDEE é ramificada. Segundo os autores, normalmente é possível realizar uma seleção lógica entre todas as estimativas possíveis.

Das (1998) propõe uma diferença em relação ao algoritmo de Srinivisan e St-Jaques (1989) que resulta em um incremento da eficiência computacional, já que como primeiro passo se estima a secção faltosa, de forma aproximada, mediante o método da reatância. Contudo, este processo continua gerando várias estimativas de secções faltosas, mas agora o algoritmo de estimação de distância se aplica só nessas secções mediante a consideração de sistemas equivalentes. O sistema equivalente que propõe Das (1998) considera às cargas à jusante concentradas no ponto final da linha e às laterais à montante como cargas concentradas nos nós de derivação, conforme mostra a Figura 2.3.

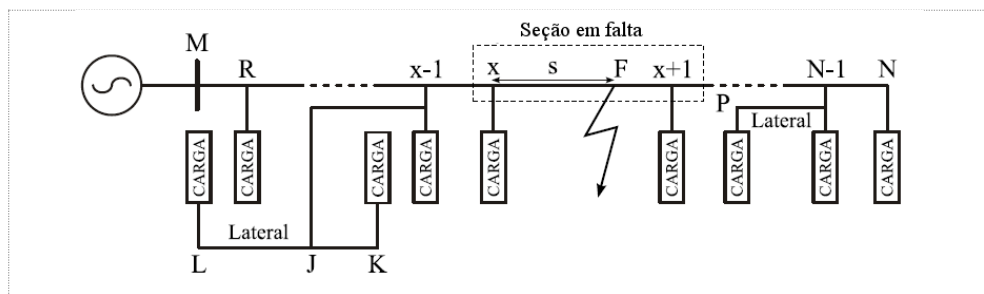


Figura 2.3 - Diagrama de um sistema de distribuição de energia elétrica em falta.
Fonte: (DAS, 1998).

Também são consideradas linhas curtas e mediante a eliminação de termos de segunda ordem e superiores, se desconsidera o efeito capacitivo. Para realizar a seleção final da secção em falta, é proposta a instalação de indicadores de falta no início de cada uma das laterais. O trabalho de Das (1998) utiliza componentes simétricas, mas fornece equações para cada tipo de falta e compila todo o processo de diagnóstico de faltas em um único trabalho, desde a sua detecção até a sua localização.

O trabalho de Zhu et al. (1997) apresenta uma diferença fundamental em relação a todos os trabalhos anteriormente mencionados, pois utiliza componentes de fase ao invés de componentes simétrica no equacionamento. Embora continue considerando linhas curtas e com efeito capacitivo desprezível, esta técnica forma as bases para todas as propostas futuras para LDF usando componentes de fase.

Considere o segmento de linha da Figura 2.4, o novo equacionamento consiste em determinar uma expressão para uma linha em falta que relaciona as medições de tensão e corrente no terminal fonte com a distância, resistência e corrente da falta, em componentes de fase:

$$V_a = D(Z_{aa} I_a + Z_{ab} I_b + Z_{ac} I_c) + I_f R_f, \quad (2.1)$$

sendo utilizadas as seguintes notações:

- D : distância entre o terminal monitorado e a falta;
- Z_{aa} : impedância própria da fase a ;
- Z_{ab} e Z_{ac} : impedâncias mútuas entre a fase a e as fases b e c , respectivamente;
- I_f : corrente de falta;
- R_f : resistência de falta;
- V_a : tensão medida na fase a ;
- I_a , I_b e I_c correntes medidas nas fases a , b e c , respectivamente.

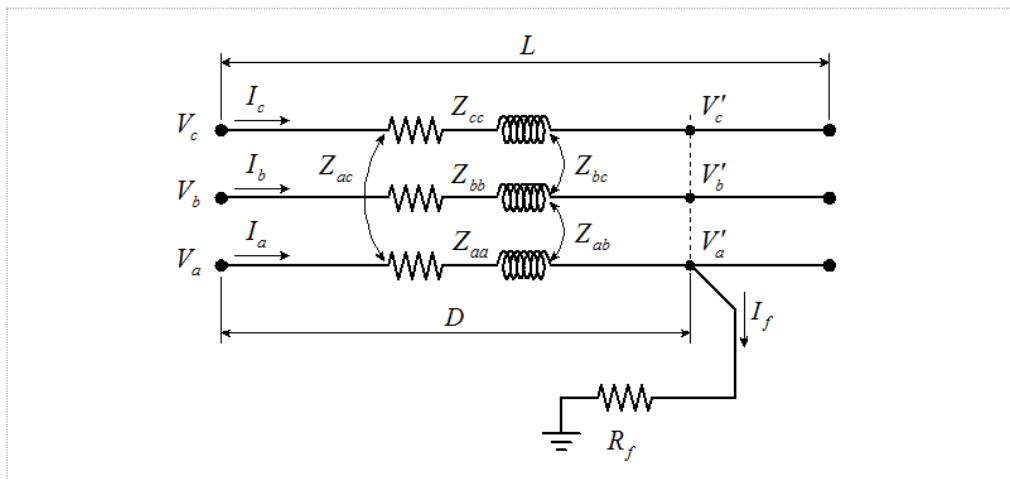


Figura 2.4 - Falta fase-terra na fase a .
Fonte: O autor (2016).

A equação (2.1) possui três incógnitas, contudo ela pode ser separada na sua parte real e imaginária, permitindo resolver a distância e resistência de maneira simultânea. A incógnita restante é a corrente de falta, a qual pode ser estimada com um algoritmo iterativo. Neste algoritmo é assumido que a corrente de falta é a diferença entre a corrente medida no terminal local durante a falta e a corrente pré-falta. Utilizando este dado se realiza a primeira estimativa do local da falta, elemento necessário para estimar a tensão no ponto da falta. Finalmente, com a tensão no ponto da falta é possível realizar um fluxo de potência para estimar uma corrente à

jusante do ponto faltoso e, portanto, uma corrente de falta atualizada. Com a nova corrente de falta se repete o processo até as distâncias estimadas convergirem. Como em cada iteração se executa um fluxo de potência, é possível considerar modelos gerais de cargas tipo ZIP. O Algoritmo de Zhu, Lubkeman e Girgis (1997) ainda leva em conta a estrutura ramificada do SD que resulta em múltiplas estimativas do local da falta. Em primeiro lugar se analisa a seção imediata à subestação, se a distância estimada for maior que o comprimento dessa seção, as medições são propagadas ao seguinte terminal para repetir o algoritmo. Finalmente, o problema das múltiplas estimativas é resolvido com uma análise das formas de ondas armazenadas. Estas ondas possuem a informação da atuação das proteções e da perda de carga pela atuação das mesmas. Tais informações são comparadas com simulações de faltas em cada local estimado usando um modelo preciso do SD que considera a coordenação das proteções. Comparando os sinais medidos com os simulados é possível determinar o local da falta com boa precisão. Apesar de ser um método que apresenta um alto grau de generalização e muito preciso, somente foi apresentado o equacionamento para faltas fase-terra, sem considerar o efeito capacitivo da linha. Outra desvantagem é que em cada iteração do algoritmo se faz necessário rodar um fluxo de potência radial, o que pode resultar em um elevado custo computacional. Entretanto, Zhu, Lubkeman e Girgis (1997) apresentam uma inovação, que é a análise da variação da expressão da distância utilizando séries de Taylor e parâmetros de incertezas. Mediante isto é possível apresentar uma forma de associar um erro provável a cada distância de falta estimada.

O método de Lee et al. (2004) aparece como uma continuação do método de Zhu, Lubkeman e Girgis (1997). Apesar de não analisar o aspecto probabilístico da estimativa da distância da falta e de continuar tratando apenas com faltas fase-terra, sem levar em conta o efeito capacitivo da linha, este trabalho propõe usar uma carga equivalente à jusante da falta ao invés de executar um fluxo de potência radial, o que incrementa a eficiência computacional. Não obstante, assume-se que a corrente e tensão das cargas são medidas, o que na prática dificilmente é possível.

Em (SALIM, 2008) é proposta uma extensão do método de Lee et al. (2004) para considerar todos os tipos de faltas. Outra grande diferença é a de realizar um fluxo de potência no estado pré-falta visando calcular uma impedância equivalente em cada nó usando as tensões e correntes estimadas para cada terminal. A última contribuição de Salim et al. (2009) versa sobre a questão da variação horária da carga no sistema de distribuição. Como a carga é um dado necessário para o fluxo de potência, e esta carga varia ao longo do dia, foi proposto definir duas impedâncias equivalentes vistas a partir da subestação. A primeira é a impedância padrão, definida como a impedância do SD, vista desde a subestação em um determinado perfil de

cargas padrão. A outra é a impedância efetivamente medida nos terminais da subestação alguns ciclos antes da falta, representando o estado do sistema logo antes da falta. A relação entre estas duas variáveis permitem estimar uma taxa de variação de carga, a qual se aplica uniformemente a cada uma das cargas para realizar um fluxo de potência pré-falta atualizado. Já, em (SALIM, R. H.; SALIM, K. C. O.; BRETAS, 2011) se apresenta a extensão do equacionamento anterior levando em consideração o efeito capacitivo. Isto resulta em dois polinômios de segunda ordem para a distância da falta, um para faltas envolvendo terra e outro para faltas sem envolver a terra. Como as equações para LDF são quadráticas, existem sempre duas soluções matematicamente possíveis. Entretanto, pode ser distinguida somente uma solução fisicamente possível, a qual é analisada em detalhe por Salim (2008).

Do trabalho realizado por Salim (2008) é possível verificar que ao considerar o efeito capacitivo, a expressão que relaciona os fasores de tensão e corrente na subestação com a corrente da falta, resistência da falta e distância, são polinômios de segunda ordem com relação à distância. Em todos os casos em que se considera ou não o efeito capacitivo, a equação de LDF pode ser separada em sua parte real e imaginária para poder resolver a distância e resistência da falta de forma simultânea. Se a falta estivesse composta por uma componente indutiva ou capacitiva além da resistiva, este artifício matemático já não seria possível. Em todos os casos em que se têm apenas medições na subestação, é necessário conceber um processo iterativo para estimar a corrente de falta. Somente em casos especiais, quando a carga pode ser considerada como uma impedância constante e o efeito capacitivo pode ser desprezado, é plausível eliminar o processo iterativo da corrente de falta com o custo de obter um polinômio de segunda ordem para a distância, como se mostra nos trabalhos de Choi et al. (2004, 2007) Entretanto, isto representa um complexo problema matemático que exige a inversão de matrizes genéricas.

2.2.2 Método baseado nas ondas viajantes

A Figura 2.5 apresenta o diagrama Lattice de um SDEE pequeno e simples constituído por quatro barras. A barra 1 representa à SDE, as barras 2, 3 e 4 contêm cargas concentradas conectadas ao longo da linha de distribuição. O diagrama de Lattice mostra a propagação completa das ondas viajantes de tensão ou corrente, que viajam na velocidade v (aproximadamente 300000 km/s) até o tempo t' , produzidas por uma falta no ponto F . Assim, a ideia essencial do método de LDF baseado nas ondas viajantes consiste na determinação do intervalo de tempo $t_{1b}-t_{1a}$ no caso de monitoração a um terminal, ou do intervalo $t_{4a}-t_{1a}$ no caso de monitoração a dois terminais. Estes momentos indicam o tempo da chegada da frente da

onda de tensão ou de corrente entre o ponto da falta e o ponto de monitoração. A partir do conhecimento a priori da velocidade de propagação da onda viajante na linha e da medição dos intervalos de tempo, é possível estimar a distância da falta. Mediante a observação da Figura 2.5 é possível perceber a superposição de várias frentes de onda chegando no terminal 1 devido à ocorrência da falta. A maioria destas frentes de onda são produzidas pela reflexão e refração nos terminais 2 e 3, da frente de onda produzida pela falta no ponto F . Este efeito gera uma dificuldade inerente aos métodos de LDF baseados em medições a um terminal, já que a chegada das frentes de onda nos tempos t_{1a} e t_{1b} devem ser diferenciadas das demais frentes de onda que atingem o terminal 1. Esta tarefa já é complicada para sistemas de baixa complexidade e impossível para sistemas com um número elevado de ramificações. Por este motivo, no SDEE é preferível monitorar vários terminais de forma sincronizada (SANTOS et al., 2013) ou, utilizar a abordagem de altas frequências (BORGHETTI et al., 2006).

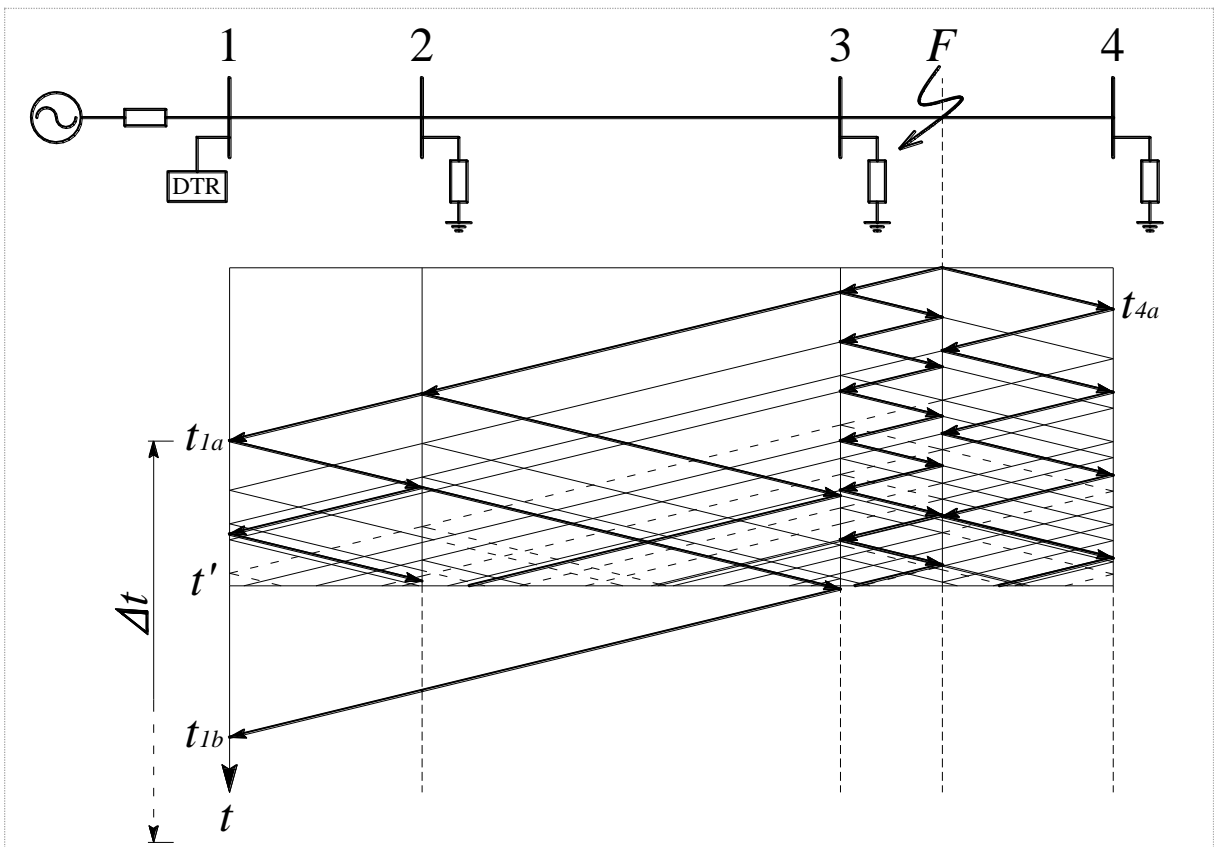


Figura 2.5 - Diagrama de Lattice que mostra o fluxo das ondas viajantes devido a uma falta em um sistema de três seções de linhas.

Fonte: O autor (2016).

Uma extensão do método por ondas viajantes, denominado método de altas frequências, consiste na determinação do conteúdo espectral do sinal transitório gerado pela falta que pode ser medido no terminal 1, durante um intervalo de tempo Δt , segundo mostra a Figura 2.5. Tal espectro está composto por frequências características que podem ser relacionadas com o ponto

da falta, sendo esta a ideia abordada neste trabalho. É possível verificar que na medida em que passa o tempo, a onda gerada pela falta se propaga no sistema, sendo refletidas várias vezes no ponto da falta e nos outros terminais até ser atenuada, de forma que o sistema assume um novo estado estacionário. Também é possível observar no diagrama Lattice que na medida em que as reflexões e transmissões das ondas viajantes se sucedem, o transitório observado em cada terminal adquire grande complexidade em pouco tempo, sendo difícil associar o espectro desse transitório com um local de falta.

Um dos primeiros trabalhos que analisa o conteúdo espectral do transitório produzido pelas ondas viajantes causadas por faltas em linhas de transmissão foi realizado por Swift (1979). O interesse fundamental deste trabalho não está no problema da LDF, mas na influência dos transitórios produzidos pelas faltas nos relés de proteção e no projeto de filtros adequados para os relés daquela época. No entanto, esta contribuição representa um ponto de partida para a LDF ao salientar que existe uma frequência característica que compõe o transitório. Esta frequência é definida como aquela que apresenta um pico de máxima amplitude no espectro de altas frequências. O trabalho de Swift (1979) explica também como o valor da frequência característica depende da distância da falta x , da velocidade de propagação da onda v e da impedância da fonte. Sob a suposição de que a resistência da falta é muito menor do que impedância característica da linha de transmissão e a simplificação de que a impedância da fonte é concentrada e puramente indutiva, são deduzidos dois valores extremos para a frequência característica:

$$f_{\min} = \frac{v}{4x}, \quad (2.2)$$

$$f_{\max} = \frac{v}{2x}, \quad (2.3)$$

A equação (2.2) se aplica quando a indutância da fonte é muito maior do que a impedância característica da linha de transmissão e a equação (2.3) no caso contrário.

Em (IURINIC et al., 2013) a atenção é focada na LDF em linhas de transmissão utilizando os transitórios produzidos pelas ondas viajantes ocasionadas pela falta, medidos em um terminal. Neste trabalho se realiza uma análise detalhada das frequências características em linhas de transmissão, considerando à impedância da fonte já não mais como compreendida entre valores extremos. Mediante um diagrama de Lattice é possível entender o processo de reflexão e transmissão das ondas como uma convolução ou filtragem em cascata, onde os coeficientes de reflexão e transmissão das extremidades formam respostas impulsivas. Com esta abordagem se verifica que a frequência característica se encontra entre os dois limiares

indicados por Swift (1979), sendo proposta também uma nova equação para LDF que leva em conta a fase do coeficiente de reflexão no terminal de monitoração. Os resultados do trabalho são encorajadores, mas ao mesmo tempo trazem à luz a complexidade do processo de propagação das ondas viajantes pelo sistema. Se este contém laterais, é difícil conseguir uma equação que relacione a frequência característica com o local da falta de maneira precisa. Entretanto é possível resolver o problema de certa maneira utilizando aproximações e heurísticas, como é mostrado a seguir.

Magnago e Abur (1999) identificam o grande potencial das técnicas de alta frequência na LDF em sistemas de distribuição e desenvolvem um método para identificar a lateral faltosa em um sistema radial ramificado, onde posteriormente se propõe aplicar algum método baseado na impedância aparente para determinar a distância até a falta. O método utiliza a Transformada Wavelet Discreta (TWD) para decompor o sinal de tensão ou corrente medido na subestação em várias escalas e calcular depois a energia associada a cada uma das escalas. O valor de energia calculado é posteriormente comparado com uma base de dados de energias, obtidas mediante simulações de faltas sobre o sistema em questão. O ramal faltoso é considerado aquele cuja energia calculada mediante simulações coincide com a determinada pelas medições. Apesar de ser este um grande avanço, a necessidade de conhecer detalhadamente o SDEE para realizar as simulações significa um grande custo na obtenção dos dados, os quais sendo errôneos produziriam resultados não satisfatórios. Além disso, se a configuração do sistema mudar, muitas simulações devem ser realizadas novamente, implicando um grande custo de tempo.

A proposta de (BORGHETTI et al., 2006) também consiste em identificar o ramal faltoso em um sistema de distribuição radial, porém usando um método determinístico, baseado na Transformada Wavelet Contínua (TWC) dos sinais de tensão. Assumindo uma topologia de alimentador principal com algumas laterais, como a ilustrada na Figura 2.6, são identificados distintos caminhos onde pode percorrer uma onda. Para cada caminho corresponde um comprimento, que combinado com a velocidade de propagação de onda e os coeficientes de reflexão de tensão em cada extremidade do caminho, irá definir uma frequência característica teórica para esse percurso, conforme:

$$f_p = \frac{v_i}{n_p \cdot L_p}, \quad (2.4)$$

em que:

- L_p : comprimento do caminho considerado;
- v_i : velocidade de propagação de onda para o modo de propagação selecionado;

- n_p : coeficiente que depende dos coeficientes de reflexão de tensão em ambas as extremidades do caminho considerado.

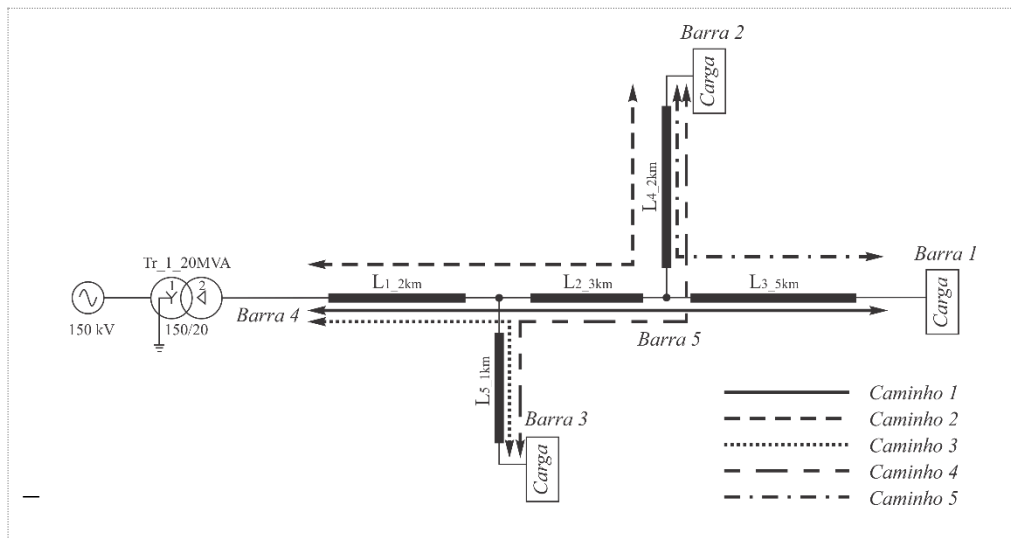


Figura 2.6 - Sistema de distribuição de energia elétrica radial.
Fonte: (BORGHETTI et al., 2006)

Cada extremidade é caracterizada por um determinado coeficiente de reflexão de tensão. As extremidades onde é conectado um transformador podem ser consideradas como circuitos abertos, cujo coeficiente de reflexão é de +1; as extremidades correspondentes a uniões entre duas ou mais linhas são caracterizadas por ter coeficientes de reflexão próximos a -1; o coeficiente de reflexão da extremidade onde ocorre a falta é considerado -1, pois a falta terá valores muito baixos em comparação com a impedância característica da linha à montante da falta. Contudo, dependendo do sinal dos coeficientes existentes entre duas extremidades, o valor n_p será 2 quando tiver o mesmo sinal ou 4 quando possuir sinais distintos.

Com base na equação (2.4) e as considerações acima citadas, a cada barra do sistema serão associadas duas frequências, uma no caso de existir uma falta na barra ($f_{p,CF}$) e outra no caso contrário ($f_{p,SF}$). O espectro do sinal transitório de tensão devido à ocorrência de uma falta em uma das barras do sistema, estará constituído por máximos locais nas frequências $f_{p,SF}$, características às barras sem falta, com um outro máximo correspondente na frequência $f_{p,CF}$, característica da barra faltosa. Para analisar este espectro, o autor aplica a TWC aos sinais digitais de tensão medidos durante a falta utilizando uma WM tipo Morlet⁶, calculando posteriormente a energia correspondente a cada escala. Cada uma destas escalas é relacionada com uma frequência correspondente à frequência central da função *wavelet* escalada, gerando uma relação de energia-frequência. Os valores picos desta relação energia-frequência são agora

⁶ De acordo com (OLIVEIRA, 2007) esta *wavelet* apresenta as melhores propriedades de preenchimento do plano tempo-frequência com relação a todas as *wavelets* contínuas.

utilizados em lugar do espectro para identificar a barra faltosa, obtendo-se resultados mais precisos, segundo o apresentado por Borghetti et al. (2006).

A maximização dos coeficientes *wavelet* está relacionada à similaridade entre o sinal e a WM, portanto (BORGHETTI et al., 2008) utiliza a primeira parte do sinal transitório para construir a WM e obter desta maneira grandes melhorias na identificação das frequências características. Já (BORGHETTI et al., 2010) apresenta um método para diminuir o erro associado à estimação da distância, o qual consiste em medir a diferença de tempo existente entre dois máximos locais dos CW na volta da frequência característica, recalculando a frequência característica como:

$$fc = \frac{1}{\Delta t}. \quad (2.5)$$

A Figura 2.7 mostra como exemplo uma situação na qual foi detectada uma frequência característica de 2,162 MHz. Neste exemplo, é realizada uma análise dos CW na faixa de $\pm 0,25$ MHz na volta desta frequência que permite identificar um tempo de 0,4425 μ s entre os máximos locais, o qual corresponde a uma frequência de 2,26 MHz diminuindo desta maneira o erro.

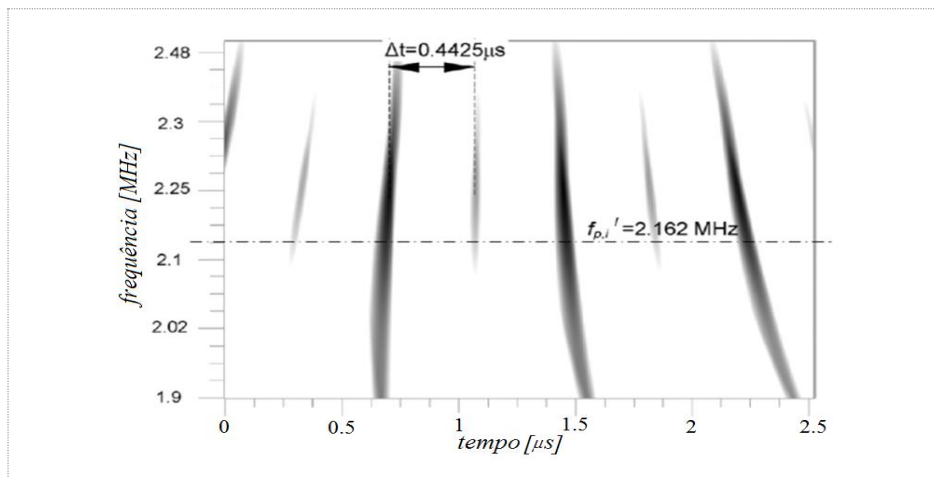


Figura 2.7 - Superfícies de níveis dos coeficientes wavelet utilizada para melhorar a estimativa da frequência característica.

Fonte (BORGHETTI et al., 2010).

Em (SADEH; BAKHSHIZADEH; KAZEMZADEH, 2013) se compara o espectro medido com uma base de dados provenientes de simulações para assim identificar a seção em falta do SD. A contribuição deste trabalho é considerar a existência de uma diferença entre a frequência característica principal e a secundária, produzida quando a onda da falta é refletida e transmitida pelas diferentes junções e barras no SD.

A principal limitação da abordagem de LDF baseada nas altas frequências é a necessidade de uma alta frequência de amostragem. Ainda, a grande complexidade no processo

de propagação das ondas viajantes em sistemas ramificados apresenta muita dificuldade para idealizar um método totalmente generalizado e determinístico.

2.2.3 Método híbrido

Geralmente, a distância da falta e a seleção do ramal de ocorrência da mesma no SDEE são determinadas empregando-se ou o método baseado na impedância aparente ou o método de altas frequências. Entretanto, a proposta de reunir os dois métodos para formar um procedimento híbrido apresenta-se como uma boa alternativa para a solução do problema de LDF em SDEE.

Em Gazzana et al. (2014) é apresentado um procedimento híbrido para LDF resistivas em SDEE, em que utiliza o método de impedância aparente aplicado segundo a técnica de (SALIM; SALIM; BRETAS, 2011) para estimar a distância da falta e as múltiplas estimativas do local da falta. Considera a seguir, a definição em quais lugares encontram-se os picos no espectro de frequências da tensão para cada ponto de falta provável, segundo a abordagem apresentada por (BORGHETTI et al., 2006). Isto significa estimar teoricamente quais seriam as frequências características segundo (2.4). Com estas frequências são definidas uma série de funções formadas pelo somatório de funções sinusoidais com as frequências teóricas. Paralelamente, os sinais de tensões de fases são transformados em tensões modais com a transformada de Clarke e se escolhe o modo adequado segundo o tipo de falta identificado. Este sinal de tensão passa por um filtro visando eliminar a influência da componente fundamental e é correlacionado com cada uma das funções definidas com as frequências teóricas. A correlação se realiza tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Finalmente, cada local de falta é associado a uma probabilidade dada pela média normalizada entre todos os coeficientes de correlação.

2.3 LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS

Todos os métodos e técnicas apresentadas até o momento foram desenvolvidos sob a consideração de que a falta se comporta como uma resistência linear e constante, cuja magnitude é baixa quando comparada com as impedâncias do sistema elétrico. Entretanto, como será apresentado no Capítulo 3 deste trabalho, uma FAI se comporta como uma resistência não linear. Isto significa que a queda de tensão na FAI não é diretamente proporcional à corrente que passa por ela. Ainda, o comportamento da FAI depende de parâmetros aleatórios tais como o tipo de falta, nível de tensão, tipo de solo e condições de

umidade do solo. A consideração de que a falta nem sempre se comporta como uma resistência linear e constante representa a principal limitação de todos os métodos para LDF apresentados nesta revisão bibliográfica, tanto para SD como para sistemas de transmissão. Para ilustrar esta ideia, considere o trecho de linha monofásica sob falta apresentado na Figura 2.8.

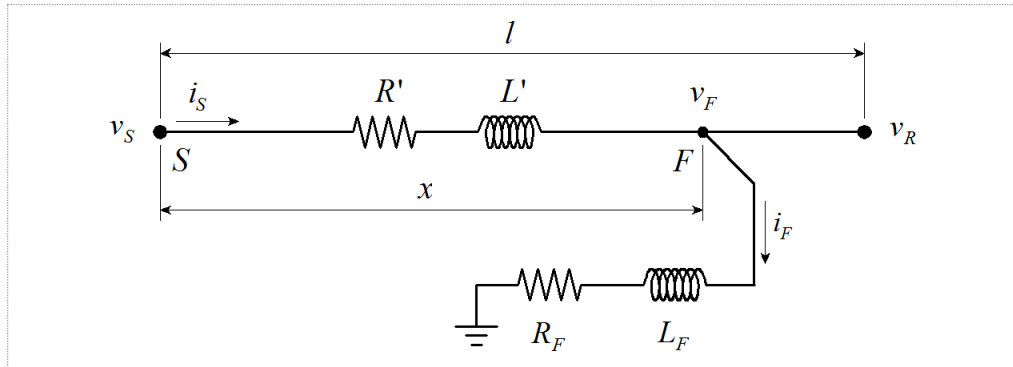


Figura 2.8 - Trecho de linha monofásica sob falta indicada no ponto F.
Fonte: O autor (2016).

Considere a equação no domínio do tempo que relaciona a tensão no ponto da falta com impedância de uma linha monofásica, a tensão e corrente medida na fonte e a distância da falta:

$$v_F(t) = v_S(t) - x \left(R' i_S(t) + L' \frac{di_S(t)}{dt} \right), \quad (2.6)$$

onde

- x : distância da falta;
- $v_S(t)$: tensão medida no terminal S em função do tempo;
- $i_S(t)$: corrente medida no terminal S em função do tempo;
- $v_F(t)$: tensão medida no ponto da falta em função do tempo;
- R' : resistência por unidade de comprimento da linha de transmissão;
- L' : indutância por unidade de comprimento da linha de transmissão.

Como se observa na equação (2.6), tem-se uma equação, mas duas incógnitas: x e $v_F(t)$. Ainda, a tensão no ponto da falta é uma função do tempo. Se a falta consiste em uma impedância linear com parte resistiva e indutiva, é possível substituir $v_F(t)$ pela relação entre corrente, resistência e indutância:

$$R_F i_F(t) + L_F \frac{di_F(t)}{dt} = v_S(t) - x \left[R' i_S(t) + L' \frac{di_S(t)}{dt} \right]. \quad (2.7)$$

onde:

- R_F : resistência da falta;

– L_F : indutância da falta.

Agora é possível aplicar a transformada de Fourier na equação anterior, e considerar o regime estacionário na frequência fundamental do sistema, ω_0 :

$$(R_F + j\omega_0 L_F)I_F(\omega_0) = V_S(\omega_0) - xI_S(\omega_0)(R' + j\omega_0 L'). \quad (2.8)$$

Pode-se ainda afirmar que o termo $(R_F + j\omega_0 L_F)$ é a função de transferência da falta, pois se comporta como um sistema linear. Se a falta é considerada puramente resistiva, a indutância da falta é nula e a equação (2.8) é equivalente às apresentadas em todos os trabalhos baseados na impedância aparente, podendo ser resolvida por qualquer uma das técnicas propostas por estes. No caso em que a falta não pode ser considerada como um sistema linear, não é possível obter uma função de transferência. Portanto, a equação (2.8) fica invalidada para as técnicas de solução do método da impedância aparente apresentadas anteriormente.

Os métodos de altas frequências se baseiam na hipótese de que a falta se comporta como o chaveamento de uma resistência linear. Pelo teorema da superposição, o chaveamento da resistência linear equivale a injetar um degrau de tensão negativa no ponto da falta. Este degrau nada mais é do que uma onda que se propaga pelo sistema e forma um transitório de altas frequências, cujas características estão relacionadas com o local da falta. Entretanto, no caso de FAI podem ser identificadas duas limitações:

- a) se a resistência possui um valor relativamente elevado, o degrau de tensão seria relativamente pequeno, o qual produziria um transitório de baixa energia e rápida atenuação. Este efeito dificulta a análise já que o transitório pode ser confundido com o ruído natural do sistema;
- b) nenhum dos trabalhos para LDF em SDEE baseado em altas frequências considera a existência de uma resistência não linear como falta, impossibilitando saber se o comportamento teórico das frequências características é mantido.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, os principais métodos e técnicas de LDF em SDEE, com ênfase em medições a um terminal, foram formalizadas por meio de uma revisão bibliográfica, considerando-se as publicações mais relevantes em um contexto cronológico. As técnicas de LDF para faltas puramente resistivas estão sólida e amplamente determinadas na literatura existente. Entretanto, quando a falta não se comporta como uma resistência linear, os métodos clássicos para LDF não podem mais ser utilizados. Por conseguinte, é necessário formular metodologias para LDFAI que levem em conta as características das FAI. Desta forma, no

Capítulo seguinte é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a natureza das FAI e sobre a definição de modelos matemáticos para representá-las.

3 CARACTERÍSTICAS E MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As FAI podem ser geradas de inúmeras maneiras, mas de uma forma geral todas possuem características similares. Este Capítulo apresenta uma seleção de trabalhos relevantes que estudam o comportamento das FAI em diferentes cenários, mostrando como todas convergem para um único conjunto de características. Estas particularidades são analisadas desde um ponto de vista físico até um ponto de vista de sinais que podem ser medidos dentro do SDEE. Na segunda parte deste Capítulo é apresentada uma revisão dos modelos de FAI mais destacados na literatura, concebidos para simulação numérica de circuitos elétricos no domínio do tempo.

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Na literatura é possível dividir os eventos que acarretam FAI em dois casos principais: a queda de condutores e o contato acidental das fases energizadas com árvores ou objetos. Por esta razão, a presente seção foi dividida com o objetivo de explicar separadamente estas duas condições. Uma terceira subseção é apresentada para explicar de um ponto de vista elétrico as características identificadas nos sinais de tensão e corrente medidos no sistema que são associadas à causa das FAI.

3.1.1 Características físicas associadas às faltas devido à queda de condutores energizados

Pode-se considerar que as FAI mais preocupantes para o setor elétrico estão associadas ao rompimento e queda de cabos energizados. Este caso se constitui em um grande problema de segurança para os seres vivos, que podem ser atingidos pelo condutor energizado ou então podem tocar inadvertidamente nestes cabos rompidos. Outra questão importante é a interrupção do fornecimento de energia elétrica. A deficiência na identificação e na localização da queda de um cabo pode levar à falta de energia por um longo intervalo de tempo na região de suprimento afetada, refletindo-se em elevados valores de DEC⁷. Por isto, as características de tensão e corrente de condutores em contato com a terra mostram-se as mais documentadas na literatura.

⁷ DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora; o intervalo de tempo médio, no período de observação, em que cada consumidor esteve privado do fornecimento de energia (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2011).

As características físicas de uma FAI, resultante do contato de um condutor energizado com o solo, são bem descritas no trabalho de Jeerings e Linders (1989). Uma FAI em geral envolve um fenômeno complexo de arco elétrico que penetra no solo, no ponto da falta. A corrente deste arco apresenta baixa magnitude e o seu comprimento é curto quando comparado com arcos em outras condições. Por exemplo, um arco de uma linha de transmissão pode se estender por vários centímetros e a corrente inicial de milhares de ampères pode fundir e vaporizar o condutor causando a formação de íons metálicos que contribuem para reduzir a impedância do arco. Entretanto, uma FAI à terra forma geralmente um arco de 5 cm ou menos, com uma corrente inicial menor do que 100 A. Pode existir uma leve vaporização do condutor que contribui na sustentação do arco, mas também pode haver uma vaporização da vegetação ou da terra pelo calor do arco. Isto também afeta as características do arco de uma forma desconhecida e aleatória. Contudo, a FAI tem um comportamento resistivo no sentido em que a corrente é zero quando a tensão passa por zero.

Segundo Jeerings e Linders (1989), o reduzido valor inicial da corrente se deve a um contato superficial entre o condutor e o solo. Como a área de contato é pequena, tanto a densidade de corrente quanto o gradiente de potencial elétrico são elevados, resultando em um arco localizado junto com a ionização do meio. Este arco então penetra no solo, aumentando deste modo o contato efetivo. Ou seja, o contato não permanece apenas na superfície da terra, mas penetra no seu interior aumentando a área efetiva do eletrodo equivalente de terra. Segundo os autores, este eletrodo efetivo de terra tem uma forma similar a uma semiesfera, que se comporta como uma resistência não linear que gera a maior parte dos harmônicos observados na corrente das FAI. Este eletrodo efetivo está conectado ao condutor caído mediante um pequeno arco no ar, o qual sendo pequeno na maioria dos casos, pode ser desprezado. Contudo, existem interações adicionais entre o solo e este arco que não podem ser simplesmente ignoradas. Por exemplo, se o condutor que estava no solo é levantado, a tendência do arco é de se estender, tornando-se mais significativo. Este efeito apresenta formas de onda de correntes erráticas, com picos que crescem e decrescem, indicando que a natureza não linear do arco elétrico no solo e no ar é diferente.

O pequeno arco no ar adquire significância quando a corrente de falta é baixa, pois a distorção harmônica aumenta na medida em que baixa a corrente de falta. Nos experimentos apresentados por Emanuel et al. (1990), comprovaram-se que em solos arenosos com umidade em excesso (15 a 20 %) o arco elétrico não é iniciado imediatamente quando o condutor toca o solo. No momento da energização a corrente é sinusoidal (sem arco). Passados alguns segundos, o solo é aquecido e a umidade evaporada, causando um aumento na porosidade e na tensão de

ignição do arco. Este arco gera um aumento do gradiente de potencial que também aquece o condutor gerando uma emissão termiônica⁸, produzindo um afastamento do condutor da capa condutiva do solo. Estes fenômenos contribuem para o crescimento do arco e a sua penetração progressiva no solo.

Os solos comumente têm certo conteúdo de sílica, que ao ser aquecida pela alta temperatura local do arco funciona como um ponto catódico. Este cátodo emite elétrons quando a tensão do condutor é positiva, diminuindo a queda de tensão e aumentando a corrente. Este fenômeno gera a assimetria típica na característica da tensão em função da corrente ($v-i$) (EMANUEL et al., 1990). Na medida em que o arco penetra o solo, dois parâmetros sofrem alteração: 1) a área na volta do eletrodo fica mais seca; 2) o balanço entre energia calórica gerada pelo arco e a energia transferida e dissipada no meio é alterado. Neste ponto são possíveis dois cenários:

- a) A umidade se difunde novamente no solo seco e o arco é reiniciado quando a frente molhada se aproxima suficientemente do condutor para romper o dielétrico. Entretanto, o caminho percorrido pelo arco será diferente do inicial, já que este caminho inicial está agora solidamente vitrificado por um tubo de fulgurito⁹. A temperatura do arco pode variar de 2000 a 3000 °C para eletrodos metálicos (SULTAN; FEDIRCHUK; SWIFT, 1994);
- b) Se o condutor caído tem múltiplos pontos de contato ou foi movimentado, outro ponto pode começar a formar um arco.

Jeerings e Linder (1989) indicam que o fenômeno no solo é algo mais complexo que um arco elétrico devido à existência de carbeto de silício (SiC) presente na maioria dos solos. Pode-se dizer que o SiC atua de forma similar a um diodo reversamente polarizado, quando a tensão de ruptura é superada, este permite a passagem massiva de elétrons que aumentam a corrente, contribuindo assim com a não linearidade $v-i$. O arco propriamente dito se forma no ar, entre o condutor e o denominado eletrodo equivalente do solo. Já em (EMANUEL et al., 1990) este fenômeno não é observado, pelo contrário, é verificado que quando o fulgurito foi formado, este atua como um resistor linear. Então a não linearidade se deve exclusivamente ao fenômeno de arco. Estes são dois pontos de vista diferentes, concluídos provavelmente porque cada autor trabalhou com tipos de solo diferentes e com ensaios diferentes também. Entretanto, as características elétricas apresentadas por ambos os autores são similares.

⁸ Aumento do fluxo de íons que saem de um metal, devido ao aumento de temperatura.

⁹ O fulgurito é o nome dado ao material formado pela fusão de minerais ou rochas, pela ação de um raio ou arco elétrico.

3.1.2 Características físicas associadas às faltas por contato de árvores com a linha

Muitas vezes, as linhas que compõem os SDEE devem atravessar zonas arborizadas, sendo, desta forma, inevitável o contato direto com folhas em crescimento, galhos ou troncos de árvores inclinadas. Os troncos das árvores vivas apresentam um bom aterramento por meio de suas raízes e fornecem um caminho para a corrente da falta. Por sua vez, esta corrente estabelece uma distribuição de potencial elétrico ao longo do tronco, cujos valores de tensão podem ser suficientemente elevados em alguns pontos, resultando em um grande risco de eletrocussão para os seres vivos (BUTLER et al., 1999). O tronco de uma árvore possui um grau considerável de umidade, fato pelo qual a sua resistividade pode ser considerada uniforme em todo o seu volume. Valores típicos desta resistividade podem variar entre 1 Ωm a 50 Ωm (DAILY, 1999). Tal resistividade uniforme permite a consideração de que o tronco se comporta como uma resistência linear, fato confirmado por Elkalashy et al. (2007), que consideraram valores entre 200 k Ω a 800 k Ω . Frequentemente o contato entre um condutor energizado e uma árvore se realiza mediante um arco elétrico, como o tronco se comporta como um resistor linear, o fenômeno de arco se torna importante, originando assim a maior parte dos harmônicos registrados nos sinais de tensão e corrente.

O arco elétrico é gerado quando o ar (ou algum gás) entre dois eletrodos que apresentam certa diferença de potencial é ionizado¹⁰. Esta ionização pode começar devido a uma elevada força eletrostática ou pela elevação da temperatura, como por exemplo, em um curto-circuito sólido temporário (SHORT, 2003). As considerações teóricas associam ao arco um canal cilíndrico no gás com um campo elétrico na direção axial. A ionização é mantida pela tensão entre os eletrodos e pela corrente de arco, cujo resultado é a injeção de energia que sustenta o arco elétrico. Esta energia é dissipada para o meio externo pela superfície envolvente do arco e pelas seções transversais à direção axial do canal. No caso de corrente alternada, após a passagem da corrente por zero o arco se extingue, mas existe ainda uma corrente residual e uma tensão de reestabelecimento transitório. Se a taxa de energia dissipada pelo meio é maior do que a injetada no período de extinção, o arco permanece extinto, caso contrário se reinicia (SHORT, 2003; ZANETTA, 2003). Mais informações sobre o equacionamento envolvido e as características físicas do arco podem ser encontradas nos trabalhos de Slepian (1928) e Browne (1948).

¹⁰ A ionização ocorre quando as moléculas de um material isolante se separam em íons e elétrons mediante o choque dos elétrons que saem de uns dos eletrodos. O meio ionizado se denomina plasma.

Muitas vezes o contato de um cabo com uma árvore não afeta imediatamente o desempenho do SDEE. Entretanto, o atrito com a casca da árvore e os efeitos do arco elétrico podem debilitar a estrutura mecânica do condutor e gerar o rompimento e queda do mesmo.

3.1.3 Características particulares dos sinais elétricos devido à presença de faltas de alta impedância

A física relacionada às FAI gera um comportamento característico da tensão em função da corrente que se propaga no SDEE a partir do ponto da falta. Estas características foram documentadas por vários pesquisadores (JEERINGS; LINDERS, 1989; EMANUEL et al., 1990; SULTAN; FEDIRCHUK; SWIFT, 1994; NAM et al., 2001; NAKAGOMI, 2006), que através de medições no ponto de falta identificaram as seguintes características:

- a) *Buildup*: a corrente de falta cresce de forma gradual;
- b) *Shoulder*: o *buildup* cessa por alguns ciclos e depois continua;
- c) Não linearidade: a curva característica tensão-corrente da FAI não é linear;
- d) Assimetria: a corrente de falta possui formas de onda diferentes para o semiciclo positivo e para o semiciclo negativo.

A não linearidade e assimetria das FAI devido à queda de um condutor energizado foram registradas primeiramente por Jeerings e Linders (1989). Emanuel et al. (1990) estudaram às FAI mediante testes de campo em um SDEE com uma tensão nominal de 13,8 kV e uma frequência nominal de 60 Hz. Também analisaram o comportamento das FAI mediante ensaios de laboratório, aplicando uma tensão de 7,9 kV com frequência de 60 Hz sobre uma configuração de recipiente cilíndrico metálico cheio de areia. Mediante os ensaios realizados no laboratório chegaram às seguintes conclusões:

- a) a corrente de falta não é simétrica já que o semiciclo positivo apresenta uma amplitude maior do que o semiciclo negativo;
- b) uma assimetria também é notada na tensão de arco, sendo sua amplitude menor no semiciclo positivo do que no semiciclo negativo;
- c) sempre que a presença de arco elétrico no solo foi detectada, estas características são mantidas para quaisquer valores de corrente.

A Figura 3.1 apresenta a curva característica $v-i$ dos experimentos realizados com a utilização de tensão sinusoidal em 60 Hz, na qual se observa claramente a relação não linear da tensão em função da corrente. Nesta curva é possível observar a existência de uma tensão de ruptura dielétrica, um valor a partir do qual a corrente começa a fluir. Outro fato importante que

deve ser ressaltado é que tanto a tensão quanto a corrente realizam a passagem por zero ao mesmo tempo, corroborando o comportamento resistivo da FAI (DJURIĆ; RADOJEVIĆ; TERZIJA, 1999; SHORT, 2003). Para os propósitos práticos, os valores de tensão positiva, V_P , e negativa, V_N , são independentes da geometria do eletrodo de alta tensão e do seu material (Cu, Al, Fe). Contudo, a compactação, porosidade e umidade do solo possuem um efeito notável sobre os valores de V_P e V_N . Solos secos ou menos densos dão lugar a valores maiores destas grandezas. Também foi observado que a nulidade de V_P e V_N implica a inexistência de harmônicos na corrente da falta.

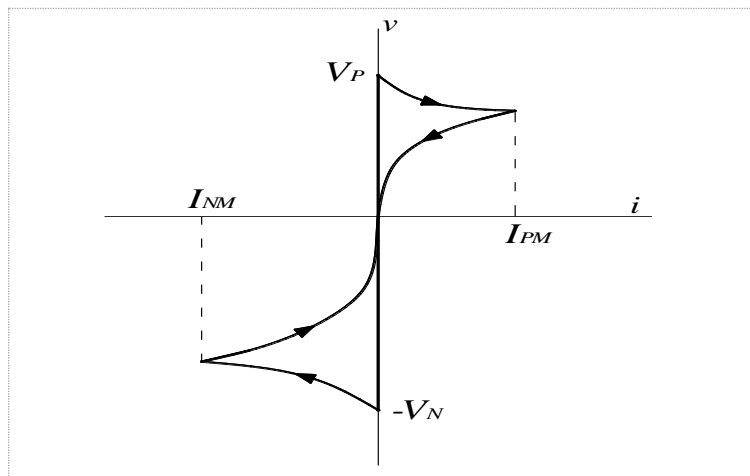


Figura 3.1 - Característica tensão-corrente de uma FAI.
Fonte: (EMANUEL et al., 1990).

A não linearidade da FAI implica uma corrente com harmônicos no ponto da falta, os quais se propagam no SDEE em maior ou menor medida dependendo das características elétricas do mesmo. O trabalho de Kimm e Russell (1988) apresenta uma análise dos harmônicos na corrente devido à presença de FAI, tendo em conta que durante o funcionamento normal do SDEE também existem harmônicos, cuja proporção é aumentada com a presença de bancos de capacitores. Kimm e Russell (1988) concluem que a amplitude dos harmônicos ímpares é predominante na condição faltosa, mas o incremento relativo dos harmônicos pares é maior durante essa condição.

O trabalho de Emanuel et al. (1990) analisa os harmônicos da corrente de falta em conjunto com os valores eficazes da mesma. Os testes de campo indicaram valores eficazes da corrente da falta menores do que 1 A e que podem chegar até a 15 A. Foi verificado que, para valores da corrente da falta maiores do que 1 A, o arco se comporta de forma estável com valores eficazes aproximadamente constantes durante longos períodos de tempo. Correntes de falta menores do que 1 A são caracterizadas por curtos períodos de arco estável e pela extinção e reignição aleatórias. Para correntes de falta maiores do que 10 A foram registrados terceiros

harmônicos com amplitude entre 5 % e 15 % do valor de amplitude da fundamental e segundos harmônicos entre 3,7 % e 6,7 % em relação à mesma referência. Para correntes entre 12 A e 15 A, a fase do terceiro harmônico permaneceu com $115^\circ \pm 15^\circ$ e a fase do segundo harmônico entre $\pm 25^\circ$. Harmônicos de ordem superior a estes foram desconsiderados por não apresentarem características confiáveis. Cabe ressaltar que os valores de harmônicos anteriores, registrados no ponto da falta, são atenuados pelo SEP e não são os mesmos que os registrados na SDE.

O trabalho de Nam *et al* (2001) está baseado em testes realizados em um SDEE real cujo nível de tensão é de 22,9 kV. Estes ensaios constaram com as medições de tensão e corrente de um ramal, cujos condutores energizados foram intencionalmente colocados em contato com o solo. A Figura 3.2 mostra a corrente em função do tempo que foi obtida em um dos ensaios realizados sobre pedras sólidas, verificando-se os fenômenos de *buildup*, *shoulder* e não linearidade durante cada ciclo. A duração e quantidade da repetição dos fenômenos de *buildup* e *shoulder* dependem do tipo de solo ensaiado. Além disso, a corrente sempre atinge um estado estável depois de alguns ciclos (de quinze a quarenta ciclos), segundo o tipo de solo. De um modo geral, as correntes de falta registradas neste artigo foram entre três a quatro vezes maiores do que as apresentadas por Emanuel et al. (1990). Para correntes de 76 A foi registrado um valor da amplitude da corrente do terceiro harmônico de 11,8 % com respeito a amplitude da fundamental, o que concorda com Emanuel et al. (1990). O segundo harmônico neste caso atingiu uma amplitude de 0,42 % em relação ao valor de amplitude da fundamental, um valor próximo de zero, pois não se observam valores apreciáveis de V_P e V_N nas características $v-i$ apresentadas. Este ponto também concorda com o apresentado por Emanuel et al. (1990).

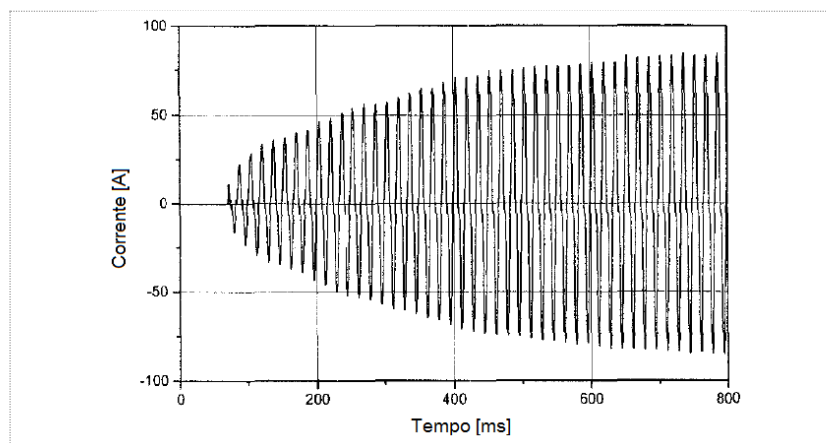


Figura 3.2 - Corrente em função do tempo de uma FAI típica.
Fonte: (NAM et al., 2001).

O trabalho de Elkalashy et al. (2007) trata as FAI produzidas quando as árvores se inclinam sobre a linha e entram em contato com um condutor energizado. O SDEE estudado é do tipo não aterrado e apresenta um nível de tensão de 20 kV com uma frequência nominal de

50 Hz. Visando obter um modelo adequado de FAI foram realizados certos ensaios de laboratório, os quais consistiram basicamente em encostar uma árvore sobre um condutor energizado de diferentes maneiras. Em primeira instância foi verificado que a árvore (ramos e tronco) apresenta uma característica $v-i$ tipicamente linear, cuja resistência depende muito da temperatura. Esta aumenta de 201 k Ω a temperatura ambiente até 800 k Ω a -15 °C, aproximadamente. A seguir, foi medida a característica $v-i$ devido ao arco elétrico. A árvore foi aproximada de forma gradual ao condutor energizado, observando que o arco elétrico é iniciado quando uma parte da árvore atinge uma distância pouco menor do que 2 ou 3 cm deste condutor. Após o início do arco, o afastamento dá árvore provoca uma extensão do arco de 4 a 7 cm, até chegar a sua extinção. Se a distância entre a árvore e o condutor for constante, a FAI continua de forma permanente. Vários ensaios foram realizados mediante o contato do condutor energizado com as folhas, ramos e tronco da árvore, observando em todos os casos que o arco se extingue quando a tensão alternada passa por zero. O tempo em que o arco permanece extinto é mais prolongado no caso de contato com as folhas e de menor duração no caso de contato com tronco. Os resultados obtidos mostraram as características clássicas de uma FAI, que são a não linearidade e a assimetria. Os valores de pico das correntes de falta medidas nos ensaios podem ser considerados relativamente baixos, na ordem dos 100 mA. Observa-se neste trabalho que os valores de pico das correntes residuais¹¹ na SDE durante a falta, estão compreendidas entre 0,6 a 60 mA. Os picos das tensões residuais na SDE durante falta são de aproximadamente 400 V. Os valores aparentemente baixos de correntes residuais são devidos ao fato de que o sistema é do tipo não aterrado. Contudo, é provável que essas baixas correntes sejam difíceis de serem detectadas ante a presença do ruído natural em um sistema real, situação que não foi destacada no trabalho de Elkalashy et al. (2007).

3.2 MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

3.2.1 Modelos de diodos antiparalelos

O modelo de diodos antiparalelos mostrado na Figura 3.3, foi apresentado inicialmente por Emanuel et al. (1990) para reproduzir de forma simplificada as características do arco elétrico gerado por uma FAI. O arco é modelado com duas fontes DC de valores V_P e V_N conectadas em forma antiparalela por meio de dois diodos ideais. Durante o semiciclo positivo, a corrente flui pelo ramo **P** enquanto que no semiciclo negativo atravessa o ramo **N**. Segundo a

¹¹ Corrente residual: o somatório dos sinais de corrente de todas as fases (analogamente para a tensão residual).

análise apresentada por Emanuel *et al* (1990), esta configuração permite controlar a assimetria mediante os valores escolhidos para V_P e V_N . Também indica que a influência do segundo harmônico na corrente de falta aumenta com o acréscimo da diferença entre os potenciais positivo e negativo ($\Delta V = V_N - V_P$). Por sua vez, esta variação não afeta o terceiro harmônico de forma significativa. Se a relação X/R diminui, a influência relativa do terceiro harmônico aumenta enquanto a influência do segundo harmônico não varia significativamente.

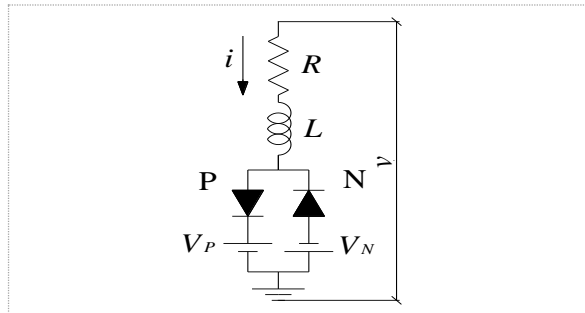


Figura 3.3 - Modelo de FAI do tipo diodos antiparalelos.
Fonte: (EMANUEL *et al.*, 1990).

Posteriormente, outros trabalhos propuseram certas variações ao modelo de Emanuel *et al.* (1990). Assim, Zamanan e Sykulski (2006) utilizam o modelo da Figura 3.4a, que permite controlar melhor a assimetria. Também é possível utilizar dois resistores não lineares sem colocar fontes DC, como mostra a Figura 3.4b, este arquétipo foi utilizado por Sharaf, Sinder e Debnath (1993). A Figura 3.4c mostra o modelo usado por Sheng e Rovnyak (2004), o qual consiste em um resistor não linear, dois diodos e duas fontes DC cujas amplitudes mudam aleatoriamente a cada meio ciclo. Com esta configuração é possível representar simplificada a dinâmica e a aleatoriedade da FAI sobre diferentes superfícies, como asfalto, areia, grama ou terra.

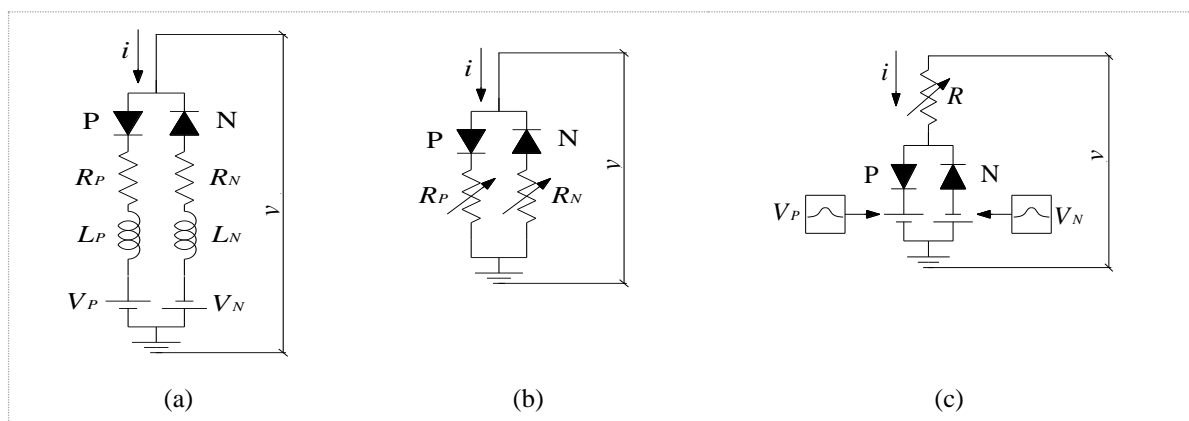


Figura 3.4 - Modificações ao modelo de diodos antiparalelos de Emmanuel *et al* (1990): (a) Modelo proposto por Zamanan e Sykulski (2006); (b) Modelo utilizado por Sharaf, Sinder e Debnath (1993); (c) Modelo proposto por Sheng e Rovnyak (2004).

Fontes: (SHARAF; SINDER; DEBNATH, 1993; SHENG; ROVNYAK, 2004; ZAMANAN; SYKULSKI, 2006)

A Figura 3.5 mostra um modelo de FAI mais sofisticado que foi proposto por Wai e Yibin (1998). Contudo, continua mantendo a mesma filosofia de diodos antiparalelos.

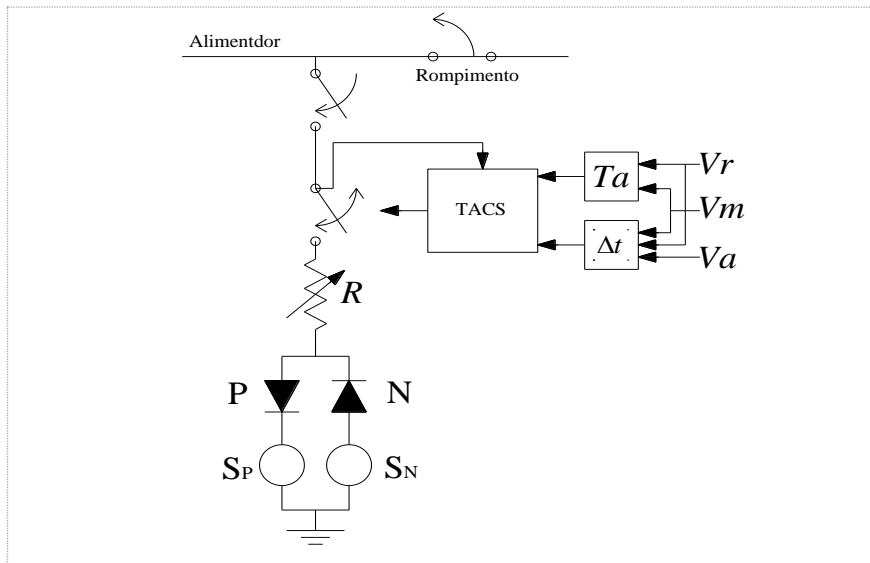


Figura 3.5 - Modelo com interruptor controlado por TACS.
Fonte: (WAI; YIBIN, 1998).

3.2.2 Modelo baseado na relação característica entre tensão e corrente de falta

O modelo descrito por Nam et al. (2001) pode ser entendido como uma “caixa preta”, pois se baseia somente na característica $v-i$ medida (ou suposta) da FAI. Visando representar as quatro características das FAI (*buildup*, *shoulders*, assimetria e não linearidade), foi proposto o modelo apresentado na Figura 3.6, que permite sua implementação no programa *Alternative Transient Program* (ATP) (BONEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007). O método proposto emprega duas resistências em série controladas por dispositivos do tipo *Transient Analysis of Control Systems* (TACS). A resistência $R_1(t)$ segue a característica não linear e assimétrica da curva $v-i$, mantida idêntica em todos os ciclos. A resistência $R_2(t)$ tem por finalidade modelar os fenômenos de *buildup* e *shoulder*, variando seu valor durante o transcurso do tempo.

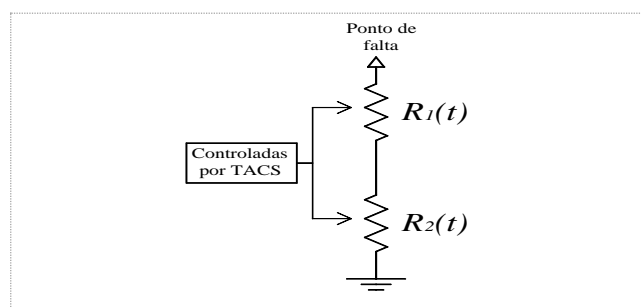


Figura 3.6 - Modelo de FAI proposto por Nam et al. (2001).
Fonte: (NAM et al., 2001)

No trabalho de Nakagomi (2006), foi realizado um ensaio de FAI sobre um solo de baixa resistividade a fim de obter o parâmetro $R_1(t)$. A característica $v-i$ do ensaio se apresenta na Figura 3.7 e está dada em pu. Deste modo, é possível definir a R_{falta} pela relação entre tensão e corrente de pico. Também se define a tensão nominal do SEP como tensão base e se calcula uma corrente base como:

$$I_{base} = \frac{V_{base}}{R_{falta}}. \quad (3.1)$$

Por último, basta multiplicar os eixos de tensão e corrente pelas bases para chegar na característica $v-i$ definitiva a ser utilizada na simulação. O trabalho de Nakagomi (2006) utiliza o mesmo modelo que Nam et al. (2001). Contudo, o controle das resistências $R_1(t)$ e $R_2(t)$ é realizado de maneira mais simples e flexível mediante a linguagem MODELS (DUBÉ, 1996). O algoritmo apresentado em Nakagomi (2006) para representar uma FAI pode ser dividido nos seguintes passos:

- dada a tensão no ponto da falta, a rotina calcula o ponto relativo a este valor de tensão na curva dada na Figura 3.7;
- verifica-se se a tensão cresce ou decresce mediante sua derivada e seleciona-se o segmento da curva dada na Figura 3.7 (subida ou descida);
- estima-se a corrente mediante uma interpolação linear;
- determina-se a resistência a partir dos valores de tensão e corrente para o ponto em questão.

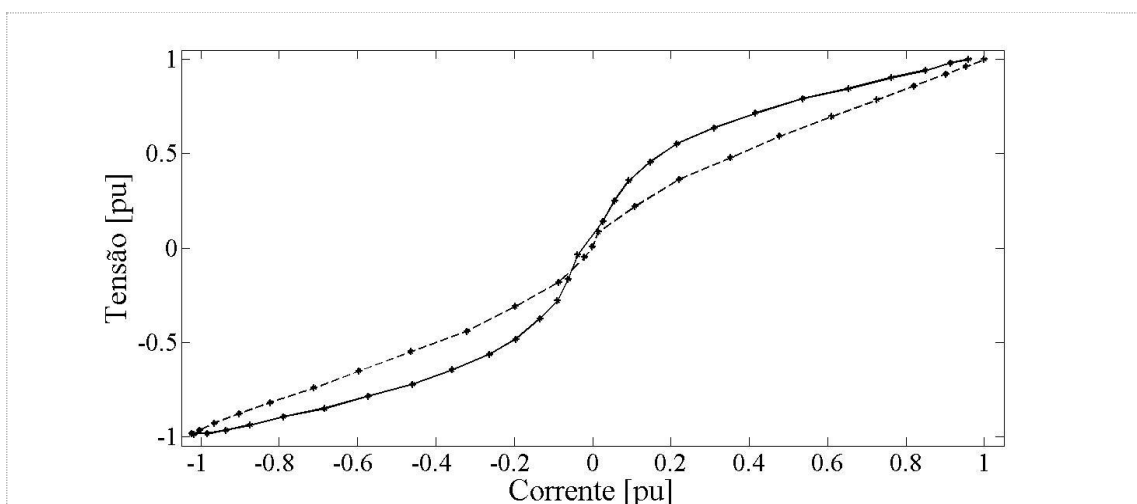


Figura 3.7 - Tensão característica em função da corrente de uma FAI modelada por Nakagomi (2006), dada em pu. Linha cheia: quando o valor absoluto da corrente de falta aumenta; linha tracejada: quando o valor absoluto da corrente de falta diminui.

Fonte: O autor (2016).

Uma equação para $R_2(t)$ é proposta por Uriarte (2003), a qual se baseia simplesmente no ajuste da curva apresentada por Nam et al. (2001), conforme:

$$R_2(t) = \frac{1600}{1 + 65 \cdot t} + 135 \cdot t. \quad (3.2)$$

A Figura 3.8 apresenta, como exemplo, o comportamento de $R_2(t)$, dado pela expressão (3.2). Para incluir o fenômeno de *shoulder* no comportamento de $R_2(t)$, esta é considerada constante em alguns intervalos de tempo.

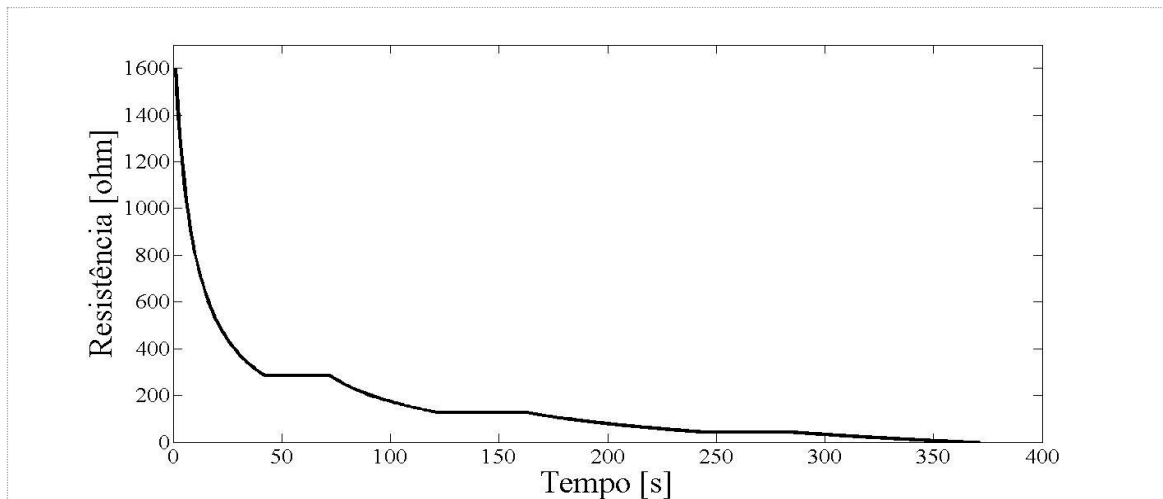


Figura 3.8 - Parte resistiva da FAI que diminui com o tempo (URIARTE, 2003).
Fonte: O autor (2016).

Um trabalho que reúne vários parâmetros necessários para simular este tipo de modelo com diferentes tipos de solos compondo a FAI foi recentemente publicado (DOS SANTOS et al., 2013). Nesse trabalho a resistência $R_2(t)$ é modelada mediante um ajuste polinomial de curvas, obtendo-se uma única equação para modelar os fenômenos de *buildup* e *shoulder*.

3.2.3 Modelos baseados nas equações do arco elétrico

Estes tipos de modelos são baseados em equações diferenciais que representam à relação existente entre a tensão e a corrente do arco elétrico, sem entrar em um detalhamento físico rigoroso dos fenômenos envolvidos. O objeto destes tipos de modelos é formar um acoplamento eficiente e viável para estudos da interação dinâmica do arco com a rede elétrica. A maioria destes modelos deriva dos trabalhos pioneiros apresentados por Cassie (1932 *apud* ZANETTA, 2003) e Mayr (1943 *apud* ZANETTA, 2003), inicialmente utilizados no desenvolvimento de disjuntores.

O trabalho de Elakalashy et al. (2007) trata as FAI produzidas quando árvores entram em contato com as linhas aéreas de média tensão. Embora o trabalho tenha sido realizado na Finlândia, considerando os tipos de árvores e cenário dos países nórdicos, os modelos

matemáticos e físicos envolvidos são de uso universal. No artigo se apresenta e se utiliza uma versão melhorada e modificada da equação dinâmica de arco para se aproximar mais ao comportamento da FAI:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G - g), \quad (3.3)$$

onde:

- g : condutância do arco variável com o tempo;
- G : condutância estacionária do arco ($G = |i|/V_{arc}$);
- $|i|$: valor absoluto da corrente que atravessa o arco;
- V_{arc} : tensão de arco (constante);
- τ : constante de tempo do arco elétrico.

Na equação existem dois parâmetros desconhecido: V_{arc} e τ . O parâmetro V_{arc} descreve o nível de corte da tensão de arco, que pode ser determinado quando $dg/dt = 0$ sincronizado com o instante em que a corrente é máxima. Este parâmetro é estimado a partir da característica $v-i$ arranjada no experimento de laboratório descrito no artigo. Uma vez conhecido V_{arc} , é possível obter-se τ mediante a discretização de (3.3):

$$\frac{g(k+1) - g(k)}{\Delta t} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{|i|}{V_{arc}} - g(k) \right) \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.4)$$

Como $g(k)$ é conhecida devido aos dados experimentais, a constante de tempo τ pode ser isolada da equação anterior. Este procedimento resulta em uma série de pontos de τ em função de g , os quais podem ser ajustados com uma equação exponencial da seguinte forma:

$$\tau = A \cdot e^{B \cdot g}, \quad (3.5)$$

onde A e B são constantes obtidas no ajuste. Como a característica $v-i$ é assimétrica, haverá valores diferentes de A , B e V_{arc} para os semiciclos positivo e negativo. Como exemplo, no artigo são mostrados os valores $V_{arc} = 2050$ V, $A = 5,6 \cdot 10^{-7}$ e $B = 395917$ para uma tensão de linha nominal de 20 kV.

A Figura 3.9 apresenta um algoritmo para resolver a equação de arco no ATP e, deste modo, simular a FAI. A entrada denominada CTR é um sinal binário que vale 0 quando o arco se extingue e 1 quando este se reinicia. Este sinal pode ser predefinido pelo usuário ou pode provir de algum bloco lógico que, por exemplo, detecte a passagem da tensão por zero. A entrada denominada RES é um valor de resistência variável que domina quando o CTR é 0, ao invés da equação de arco. No trabalho de Elkalashy et al. (2007), esta resistência foi considerada

como $0,5 \text{ M}\Omega/\text{ms}$ depois da extinção do arco e durante 1 ms , sendo que depois é mantida em $0,4 \text{ M}\Omega/\text{ms}$ até a religação do arco elétrico.

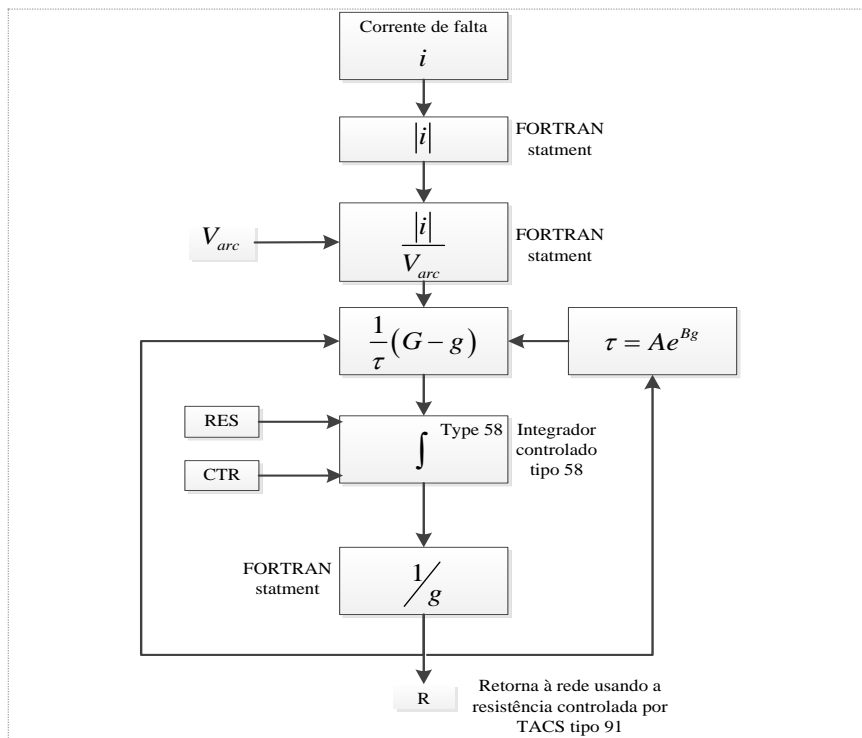


Figura 3.9 - Algoritmo para a resolução da equação de arco no programa ATP.
Fonte: (ELKALASHY et al., 2007).

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Capítulo iniciou com a apresentação das principais características das FAI desde um ponto de vista puramente físico, para depois prosseguir na exposição das características presentes nos sinais de tensão e corrente das faltas deste tipo. Posteriormente, foi realizada uma revisão dos principais modelos matemáticos encontrados na literatura técnica, focados na simulação via programas de transitórios eletromagnéticos. Estes modelos são baseados em diodos antiparalelos, modelos empíricos fundamentados na medição da características tensão-corrente da FAI e modelos baseados nas equações de arco elétrico. O Capítulo seguinte versará sobre uma revisão bibliográfica sucinta sobre métodos de detecção de FAI e sobre um aprofundamento maior nas principais técnicas de LDFAI para SDEE.

4 DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA

As FAI geram valores eficazes de correntes pouco significativos para a atuação dos dispositivos de proteção por sobrecorrente, confundindo-se, deste modo, com o carregamento normal do SEP. Porém, pelas suas características físicas, as FAI geram distúrbios particulares nos sinais de tensão e corrente que podem ser utilizados para a sua detecção e classificação. Entretanto, devido a estas características serem muito sutis quando comparadas com os sinais normalmente presentes no SDEE, detectar uma FAI é uma tarefa complicada a qual tem sido alvo de pesquisas durante muito tempo. A detecção e a classificação de um distúrbio eletromagnético decorrente de um evento nos SEP são os primeiros passos a serem dados para que se possa armazenar os sinais digitalizados e deste modo analisar e inferir sobre a probabilidade de um local em falta. Por conseguinte, este Capítulo começa com a apresentação da seleção de certos trabalhos disponíveis na literatura que propõem métodos para a detecção de FAI, incluindo aqueles que deram origem a produtos comerciais. A segunda parte do Capítulo apresenta uma descrição detalhada sobre os principais métodos encontrados na literatura que abordam a problemática da LDFAI em SDEE.

4.1 O PROBLEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA

Assim como foi relatado no Capítulo 3 do presente trabalho, as FAI possuem características muito sutis que não podem ser detectadas mediante dispositivos convencionais de proteção por sobrecorrente. Como uma FAI sempre envolve um caminho para o terra da corrente de falta, a solução primordial para o problema da detecção deste tipo de falta foi o uso de um relé dedicado à medição da corrente residual. Isto é incorporado na maioria dos relés atuais pela função de proteção por sobrecorrente residual. Sendo esta a forma mais simples de detecção de uma FAI, tal solução não chega a ser efetiva em muitos casos, porque a existência de cargas desequilibradas também pode gerar correntes residuais. De acordo com o tipo de aterramento do SDP, a proteção por sobrecorrente residual é mais ou menos eficiente. Em SDP multiterrados a corrente de falta é repartida entre a terra e o condutor de neutro, sendo difícil distingui-la da corrente de desequilíbrio das cargas. Nos SDP não aterrados a corrente de desequilíbrio das cargas fecha um circuito pela terra com o aterramento do transformador de distribuição, razão pela qual a proteção de terra produz melhores resultados. Entretanto, neste caso, as faltas fase-terra geram correntes menores, com uma parte desta retornando pela

capacitância da linha. Assim, é possível concluir que a proteção por sobrecorrente residual não resolve todos os problemas, implicando a necessidade de desenvolver métodos e algoritmos especializados em detectar FAI. Contudo, em um sistema para detecção de FAI, são características desejáveis: um custo relativamente baixo, a possibilidade de usar sinais provenientes de qualquer relé digital, a facilidade de instalação e a generalidade de operação. Também é desejável conseguir um balanço ótimo entre disponibilidade¹² e segurança¹³, mas geralmente se prefere um algoritmo mais confiável, nos casos em que a detecção de FAI implicar apenas em um sinal de alarme.

Analisando a discussão de Aucoin e Russell (1982), a detecção de FAI não é um problema novo, mas que vem sendo estudado desde antes de 1937, com o desenvolvimento de um relé detector de FAI em sistemas de transmissão de alta tensão. Por limitações tecnológicas da época não foram atingidas soluções confiáveis para os SDEE. Com o advento da tecnologia digital nos anos de 1970, os primeiros artigos referentes ao tema constituem um trabalho de pesquisa realizado na Universidade de Texas (*Texas A&M University*), o qual foi finalizado em 1994 com a apresentação de um equipamento comercial para detecção e classificação de FAI. Tal linha de pesquisa pode ser seguida mediante os seguintes trabalhos: Aucoin e Russell (1982) propõem utilizar as características do ruído em altas frequências para detectar a presença de uma FAI. Este método foi posteriormente complementado mediante a utilização do conteúdo de interharmônicos nos sinais de corrente (AUCOIN; RUSSELL, 1987). A implementação integrada da metodologia feita em um protótipo é apresentada no artigo de Russell, Mehta e Chinchali (1988). Já, os trabalhos posteriores estudam e sugerem utilizar o conteúdo harmônico em baixa frequência, até o 20º harmônico, característico das FAI (KIM; RUSSELL, 1989; KIM, C.J. RUSSELL, 1988).

Entre outras abordagens que não são relacionadas à *Texas A&M University*, destaca-se o trabalho de Jeerings e Linders (1991), que se baseia na análise da fase do 3º harmônico de corrente em relação à fase da componente fundamental de tensão para detectar a presença de uma FAI e diferenciá-la de um harmônico normal do SDEE. Mais recentemente, Kim et al. (2002) e Elkalashy et al. (2007, 2008) apresentaram propostas baseadas na TWD que tornaram os algoritmos mais simples. Muitas outras metodologias foram propostas para detectar FAI em

¹² Disponibilidade: habilidade do relé para detectar todos os eventos para o qual foi projetado a detectar.

¹³ Segurança: habilidade do relé para não detectar indevidamente aqueles eventos para o qual foi projetado a não detectar.

A confiabilidade é a combinação da disponibilidade e a segurança e representa o grau de certeza com que o relé realiza a função prevista. Ao aumentar a disponibilidade do equipamento de proteção, diminui-se a segurança, e vice-versa (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

SDEE utilizando redes neurais e princípios estatísticos, as quais são compiladas na revisão apresentada por Sediguizadeh, Rezazadeh e Elkalashy (2010), sendo a proposta de Gautam e Brahma (2013), baseada na morfologia matemática, umas das mais recentes publicações. Contudo, atualmente existem equipamentos comerciais que concentram algoritmos especiais para detecção e identificação de FAI em SEP, conforme são descritos a seguir.

4.1.1 Fabricante General Electric (GE)

Os algoritmos empregados no(s) equipamento(s) deste fabricante são os desenvolvidos pela *Texas A&M University* desde 1977 até 1994. Patterson et al. (1994) apresentam as características fundamentais destes algoritmos, os quais são basicamente fundamentados na análise combinada de mudanças bruscas de energias em altas frequências, nível de aleatoriedade nos sinais monitorados, comportamento da carga vista pelo equipamento, informações da atuação das proteções e análise de padrões de arco na corrente de neutro.

4.1.2 Fabricante Asea Brown Boveri (ABB)

Stoupis et al. (2004) mostram os algoritmos desenvolvidos pela *Lafayette College* e adotados pela empresa ABB. Estes são baseados em redes neurais, TWD e métodos estatísticos de elevada ordem. O funcionamento exato dos algoritmos não é apresentado por constituir um segredo comercial.

4.1.3 Fabricante Schwitzer Engineering Laboratory (SEL)

A SEL procurou soluções para a identificação de FAI que fossem simples o suficiente para serem embarcadas em seus relés atuais, sem a necessidade de desenvolver um *hardware* dedicado a esta função. Segundo Hou (2007) e de forma resumida, o algoritmo da SEL utiliza as componentes harmônicas e interharmônicas, empregando limiares adaptativos segundo o valor médio dos interharmônicos. A grande diferença do algoritmo da SEL em relação aos da GE e ABB é que todas as técnicas de inteligência artificial foram substituídas por contadores e comparadores, simplificando significativamente a implementação das funções de proteção.

4.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Na situação em que uma FAI é detectada mediante algum algoritmo adequado, a partir de medições de tensões e correntes na subestação, o sistema inteiro deveria ser desenergizado

para assim eliminar os efeitos que uma FAI pode causar, pois não se teria conhecimento do local da falta (AUCOIN; RUSSELL, 1982). Além disso, deveria ser enviada uma equipe para inspecionar o sistema e corrigir o defeito, podendo implicar um longo tempo de interrupção, o que acarretaria prejuízos à concessionária e aos consumidores de energia elétrica. Deste modo, o procedimento seguinte à detecção deveria ser a estimativa do ponto de falta e a direção da atenção para esse local em particular. Existe escassa literatura sobre LDFAI em SEP, em particular para os SDEE, e a maioria oferece como solução ao problema a instalação de dispositivos indicadores de faltas ao longo do sistema, visando obter mais informações que possibilitem resolver o problema. Estes indicadores de faltas, ainda, devem considerar as características não lineares das FAI, pois estas impossibilitam o uso de algoritmos convencionais, conforme descrito no Capítulo 2. A seguir são apresentados os métodos atualmente disponíveis na literatura para LDFAI em SDEE.

4.2.1 Método de Djuric, Radojevic e Terzija (1999)

Este artigo propõe um algoritmo para detecção de faltas de arco e estimação da sua distância visando à proteção de linhas de transmissão, não sendo precisamente a LDF o foco deste trabalho. Nesta abordagem é apresentado também um modelo para a falta de arco que coincide com um caso particular do modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990). Ainda, aborda uma forma de estimar os parâmetros deste modelo, incluindo a distância da falta, mediante a utilização do estimador de MQ. Djuric, Radojevic e Terzija (1999) propõem um método de um terminal baseado na decomposição das grandezas em componentes simétricas, sem levar em consideração a capacitância da linha. A proposta dos autores inicia-se com o desenvolvimento das equações das tensões de sequência positiva, negativa e zero para uma linha com uma falta fase-terra, sendo este o único tipo de falta analisado. Segundo a Figura 4.1, é possível a obtenção do seguinte conjunto de equações:

$$v_p(t) = R i_p(t) + L \frac{di_p(t)}{dt} + v_{Fp}(t), \quad (4.1)$$

$$v_n(t) = R i_n(t) + L \frac{di_n(t)}{dt} + v_{Fn}(t), \quad (4.2)$$

$$v_0(t) = R_0 i_0(t) + L_0 \frac{di_0(t)}{dt} + v_{F0}(t), \quad (4.3)$$

onde:

- v_p, v_n, v_0 : tensões de sequência positiva, negativa e zero no terminal local;
- i_p, i_n, i_0 : correntes de sequência positiva, negativa e zero no terminal local;

- v_{Fp}, v_{Fn}, v_{F0} : tensões de sequência positiva, negativa e zero no ponto da falta;
- R, R_0 : resistência de sequência positiva e zero da linha de transmissão;
- L, L_0 : indutância de sequência positiva e zero da linha de transmissão.

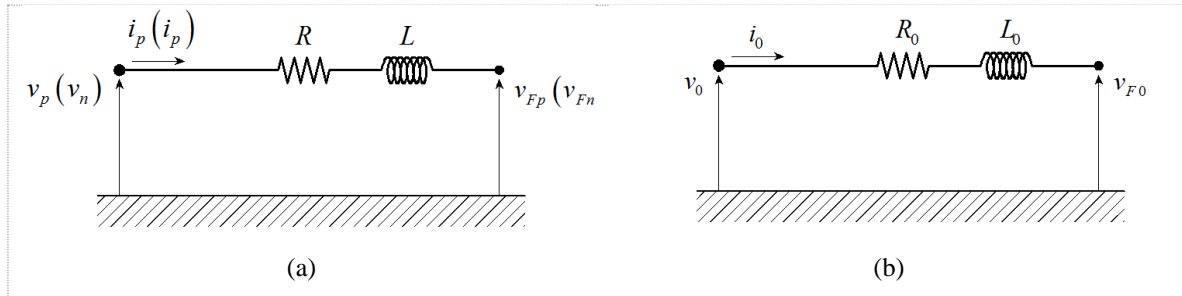


Figura 4.1 - a) circuito de sequência positiva e negativa; b) circuito de sequência zero.
Fonte: (DJURIC; RADOJEVIĆ; TERZIJA, 1999).

Somando as equações (4.1), (4.2) e (4.3), obtêm-se:

$$v(t) = Ri(t) + (R - R_0)i_0(t) + L \left(\frac{di_p(t)}{dt} + K_L \frac{di_0(t)}{dt} \right) + v_F(t), \quad (4.4)$$

onde:

$$K_L = \frac{(L_0 - L)}{L}; \quad (4.5)$$

- v : tensão da fase em falta no terminal local;
- i : corrente da fase em falta no terminal local;

A tensão da fase faltosa no ponto da falta pode ser expressa segundo:

$$v_F(t) = v_a(t) + R_a i_a(t), \quad (4.6)$$

onde:

- v_a : tensão do arco da falta;
- i_a : corrente que flui pela impedância de falta.
- R_a : resistência da falta.

A tensão de arco da equação (4.6) pode ser modelada por uma onda quadrada corrompida por um ruído.

$$v_a(t) = V_a \text{sign}(i_a(t)) + e(t), \quad (4.7)$$

onde:

- $\text{sign}(x)$: é a função sinal, definida como 1 se $x \geq 0$ e -1 se $x < 0$. Esta representa uma onda quadrada;
- V_a : é a amplitude da onda quadrada. Este valor é obtido como o produto do gradiente da tensão de arco e o comprimento do arco (este valor está entre 12 e 15 V/cm para a faixa de

100 A a 20 kA e o comprimento do arco pode ser o comprimento de *flashover* de uma corrente de isoladores ou o comprimento de *flashover* entre condutores de fase);

– $e(t)$: é um ruído branco ou gaussiano de média zero.

Incorporando (4.7) em (4.6):

$$v_F(t) = V_a \text{sign}(i_a(t)) + R_a i_a(t) + e(t). \quad (4.8)$$

Para simplificação, é possível supor que a corrente de falta é proporcional à corrente de sequência zero, isto é $i_a = k_0 i_0$, onde k_0 é o coeficiente de proporcionalidade. No caso em que não se está interessado em estimar a resistência da falta, este coeficiente não precisa ser conhecido. Finalmente, substituindo (4.8) em (4.4):

$$v(t) = R i(t) + L \left(\frac{di_p(t)}{dt} + K_L \frac{di_0(t)}{dt} \right) + V_a \text{sign}(i_a(t)) + R_e i_0(t) + \xi(t), \quad (4.9)$$

onde $R_e = (R_0 - R + k_0 R_a)$ e $\xi(t)$ é o resíduo, ou seja, o termo que contem os erros de medição e de modelagem da linha e o arco. A equação (4.9) pode ser escrita na sua forma discreta com segue:

$$v[n] = R i[n] + L \left[\text{deriv}(i_p[n]) + K_L \text{deriv}(i_0[n]) \right] + V_a \text{sign}(i_a[n]) + R_e i_0[n] + \xi[n], \quad (4.10)$$

onde $n=1, 2, 3, \dots, N$, um conjunto de amostras a partir de um tempo de referência t_0 , o qual pode ser, por exemplo, um par de ciclos depois do início da falta. A quantidade de amostras utilizadas, N , também possui um valor arbitrário. Os termos $\text{deriv}(i_p[n])$ e $\text{deriv}(i_0[n])$ representam aproximações discretas das derivadas da corrente de sequência positiva e negativa, respectivamente. Estas podem ser calculadas considerando o período de amostragem T da seguinte maneira, utilizada pelos autores:

$$\text{deriv}(i_x[n]) = \frac{i_x[n+1] - i_x[n-1]}{2T}. \quad (4.11)$$

A equação (4.10) pode ser rescrita em forma matricial

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & a_{41} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & a_{42} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & a_{3n} & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1N} & a_{2N} & a_{3N} & a_{4N} \end{bmatrix} \mathbf{0} + \xi, \quad (4.12)$$

onde:

$$a_{1n} = i[n]; \quad (4.13)$$

$$a_{2n} = \text{deriv}(i_p[n]) + K_L \text{deriv}(i_0[n]); \quad (4.14)$$

$$a_{3n} = \text{sign}(i_a[n]); \quad (4.15)$$

$$a_{4n} = i_0[n]; \quad (4.16)$$

$$\boldsymbol{\theta}^T = [R \quad L \quad V_a \quad R_e]; \quad (4.17)$$

$$\mathbf{v}^T = [v[1] \quad \cdots \quad v[n] \quad \cdots \quad v[N]]; \quad (4.18)$$

$$\boldsymbol{\xi}^T = [\xi[1] \quad \cdots \quad \xi[n] \quad \cdots \quad \xi[N]]. \quad (4.19)$$

E a equação (4.12) pode ser rescrita em uma forma compacta como:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\xi}. \quad (4.20)$$

Finalmente, utilizando o estimador de MQ é possível estimar o vetor de parâmetros $\boldsymbol{\theta}$ aplicando a seguinte operação:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{v}. \quad (4.21)$$

Com base no raciocínio anterior, é perceptível que a corrente de falta é considerada diretamente proporcional à corrente de sequência zero medida no terminal local. Esta consideração é válida somente para as condições em que a corrente de sequência zero proveniente do desbalanceamento das cargas é nula e o terminal remoto é passivo.

4.2.2 Método de Bretas et. al. (2006)

As redes neurais são também uma opção para realizar a LDF em SDEE. Deste modo, Bretas et al. (2006) propõem um método para LDFAI para SDP baseado em medições apenas na SDE. Para isto é utilizada uma arquitetura de neurônios tipo 5-7-1 (5 entradas, 7 neurônios escondidos e uma saída) e os sinais de entrada estão compostos pelo seguinte vetor:

$$X = \left[|V^{1h}| \quad |I^{1h}| \quad |I^{3h}| \quad \Delta\theta^{1h} \quad \Delta\theta^{3h} \right], \quad (4.22)$$

onde:

- $|V^{1h}|$: Magnitude do fasor fundamental de tensão;
- $|I^{1h}|$: Magnitude do fasor fundamental de corrente;
- $|I^{3h}|$: Magnitude do fasor do terceiro harmônico de corrente;
- $\Delta\theta^{1h}$: Diferença angular entre os números complexos V^{1h} e I^{1h} ; e

- $\Delta\theta^{3h}$: Diferença angular entre os números complexos V^{3h} e I^{3h} .

O método de Bretas et al. (2006) considera uma linha com cargas intermediárias concentradas. Isto pode ser considerado também como sendo um alimentador principal cujos ramais foram reduzidos a cargas concentradas. O resultado do processo é um valor entre 0 e 1, significando distâncias entre o início e o final da linha.

4.2.3 Método de Elkalashy et. al. (2008)

Elkalashy et al. (2008) tratam o problema de faltas produzidas pelo contato de árvores com uma linha aérea empregando a TWD, em que esta permite detectar detalhes de altas frequências de forma bastante eficiente. O contato intermitente de galhos de árvores com as linhas da rede elétrica gera arcos elétricos associados a altas impedâncias. A característica da periodicidade da religação do arco elétrico, devido à passagem por zero da corrente, é utilizada para detectar a presença e localizar a FAI produzida em um SDEE. A abordagem adotada por Elkalashy et al. (2008) precisa de medidores de tensão e corrente instalados em diversos pontos de monitoração do sistema de distribuição. Estes devem enviar as suas informações para um ponto de controle, onde são tomadas as decisões. Os sistemas de monitoração utilizados no trabalho de Elkalashy et al. (2008) possuem capacidade de processar dados e realizar os diversos cálculos, para depois transmitir as informações com um sistema sem fio (*wireless*). A filosofia desta proposta é apresentada na Figura 4.2.

Como foi explicado anteriormente, o arco elétrico produzido pelo contato de uma árvore é reinicializado cada vez que a corrente passa por zero. Isto gera um aumento nas tensões e correntes residuais junto com transitórios de alta frequência nos momentos de religação do arco. Esta variação é medida em todos os monitores instalados devido aos acoplamentos indutivos e capacitivos. Utilizando o terceiro detalhe (d3) de uma TWD aplicada aos sinais residuais em cada medidor, realiza-se a soma dos valores absolutos da tensão residual ao longo de um ciclo:

$$S_{d3}(k) = \sum_{n=k-N+1}^k |d3_{-u_r}(n)|, \quad (4.23)$$

e a potência elétrica na faixa de frequências é definida por d3:

$$P_{d3}(k) = \sum_{n=k-2N+1}^k [d3_{-u_r}(n) \cdot d3_{-i_r}(n)]. \quad (4.24)$$

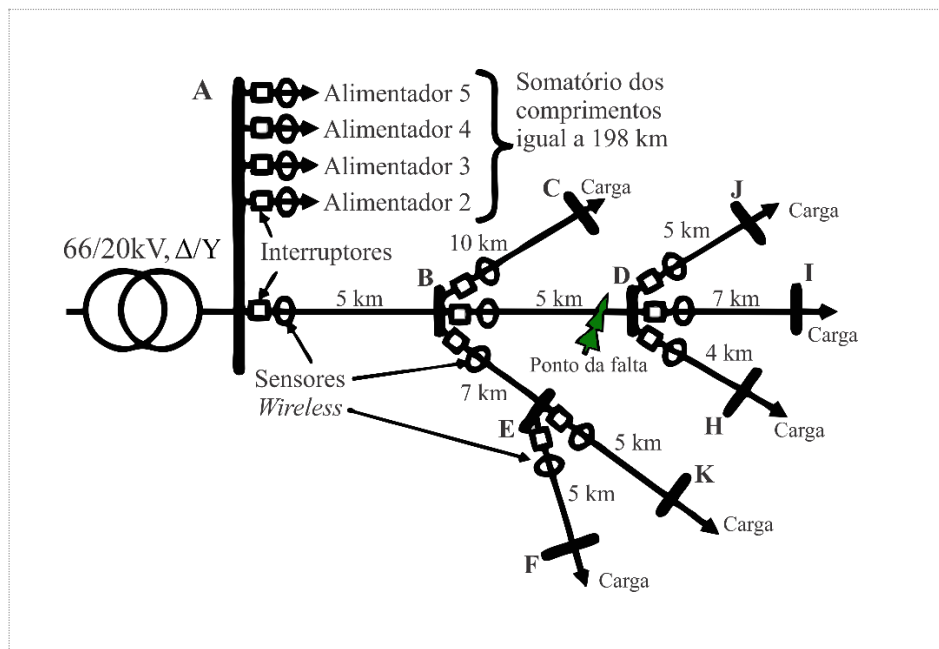


Figura 4.2 - Sistema de distribuição de energia elétrica com a instalação dos indicadores de faltas interconectados com um sistema *wireless*.
Fonte: (ELKALASHY et al., 2008).

A presença de uma FAI é detectada quando S_{d3} é maior do que um determinado limiar. O trecho em falta é localizado mediante a seguinte observação: a tensão e corrente residuais medidas nos medidores instalados em trechos sem falta estão em fase, produzindo uma P_{d3} positiva. No entanto, o sinal da P_{d3} nos medidores instalados a montante da falta terá sinal negativo (ELKALASHY et al., 2008). Deste modo, a partir dos dados enviados pelos monitores e seguindo uma sequência lógica adequada, é possível identificar o trecho do sistema em falta. Para melhorar a robustez do algoritmo, é possível adicionar um contador de tempo ao fazer a decisão da existência da falta. Este processo é mostrado na Figura 4.3. No trabalho foi utilizada uma frequência de amostragem de 100 kHz, correspondendo a uma faixa de 6,25 kHz a 12,5 kHz no d3 da *wavelet* mãe tipo *Daubechies* 4. É importante ressaltar que a faixa de frequências que cada detalhe da TWD representa varia com a frequência de amostragem. Assim, se esta for de 50 kHz, por exemplo, deveria ser utilizado o d2 e se for de 2 kHz deveria ser usado o d1. Apesar de apresentar um desempenho ótimo em simulações, não são encontrados registros da aplicação deste método em sistemas reais. A influência do ruído em sinais provenientes de sistemas reais pode piorar significativamente o desempenho da TWD nos detalhes de altas frequências, podendo inclusive invalidar totalmente esta abordagem.

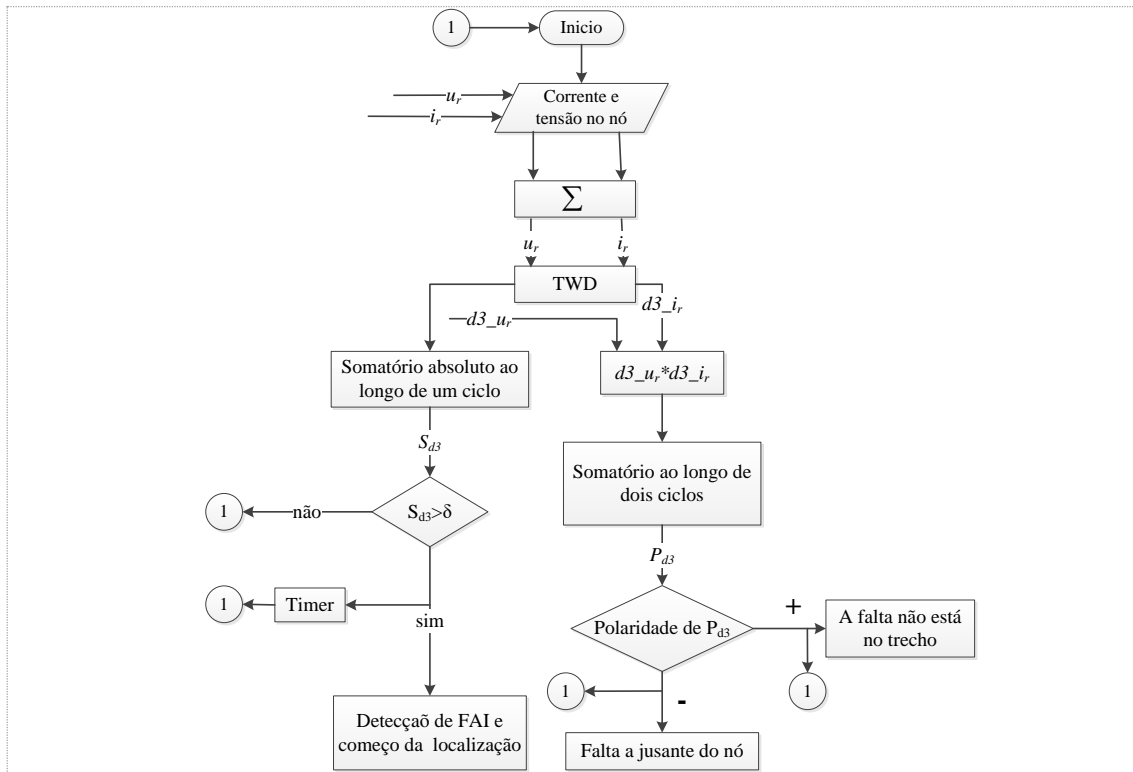


Figura 4.3 - Algoritmo de LDFAI por TWD utilizando medidores localizados em vários locais do sistema. Fonte: (ELKALASHY et al., 2008).

4.2.4 Método de Zhou et. al. (2011; 2012)

Outra técnica para LDFAI que utiliza medições em vários terminais é apresentada em (ZHOU et al., 2011), onde são utilizadas as leis básicas de circuitos para detectar os nós faltosos em um SDEE. O método precisa da medição de tensões em alguns nós do sistema, para depois utilizar a equação do circuito:

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V}, \quad (4.25)$$

onde:

- \mathbf{I} e \mathbf{V} : são vetores de dimensão $m \times 1$;
- \mathbf{Z} : uma matriz quadrada de dimensão $m \times m$;
- m é o número de nós do sistema de distribuição.

Adicionalmente, \mathbf{V} contém as tensões de todos os nós do sistema enquanto \mathbf{I} as correntes totais de cada nó, onde a corrente total é definida como sendo a soma de todas as correntes das linhas conectadas ao nó. \mathbf{Z} é a matriz de impedâncias que relaciona \mathbf{I} com \mathbf{V} , que pode ser obtida com as leis de Kirchhoff.

Considerando a relação (4.25), é possível separar o seguinte conjunto reduzido desta equação:

$$\mathbf{Z}_0 \mathbf{I} = \mathbf{V}_0, \quad (4.26)$$

onde \mathbf{V}_0 é um vetor de dimensão c que representa o número de nós sendo medidos. Correspondentemente, \mathbf{Z}_0 é uma matriz de dimensão $c \times m$ e é formada pelas c linhas remanescentes da matriz \mathbf{Z} . O vetor \mathbf{I} é composto majoritariamente por elementos nulos (zero), existindo apenas dois casos em que os elementos são diferentes de zero:

- a) quando existe injeção de potência devido a um gerador (ou fonte);
- b) quando o nó possui uma conexão à terra, esta conexão representa uma falta de qualquer tipo.

Segundo a configuração do sistema, existe um número c mínimo de pontos de monitoração para poder aplicar o seguinte algoritmo, o qual pode ser estudado com métodos de otimização de funções.

Supondo que todas as injeções de corrente são conhecidas e armazenadas em um vetor \mathbf{I}_P , define-se o seguinte vetor:

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} - \mathbf{I}_P. \quad (4.27)$$

Por conseguinte:

$$\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}' = \mathbf{V}'_0, \quad (4.28)$$

onde:

$$\mathbf{V}'_0 = \mathbf{V}_0 - \mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_P. \quad (4.29)$$

O número de elementos não zeros em \mathbf{I}' é igual ao número de nós faltosos. O vetor \mathbf{I}' é resolvido mediante Mínimos Quadrados¹⁴ (MQ) com a restrição de ter só um pequeno número de elementos não nulos em \mathbf{I}' . Zhou et al. (2011) propõem que essa restrição seja imposta, forçando a certa combinação de elementos não serem zeros e resolver \mathbf{I}' com todas as possíveis combinações (de nós faltosos considerados). Segundo os autores, o método teve um desempenho ótimo, conseguindo resolver as equações em 50 ms (3 ciclos da frequência fundamental de 60Hz). Já Zhou et al. (2012) refinaram o método mediante um algoritmo para detectar fontes de harmônicos no sistema.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentada uma revisão sucinta sobre métodos para detecção de FAI e foi realizada uma revisão mais detalhada sobre as técnicas de LDFAI em SDEE. Os escassos

¹⁴ É um dos métodos de estimação de parâmetros mais conhecidos e mais utilizados em diversas áreas de ciência e tecnologia (AGUIRRE, 2007). Uma revisão deste método é apresentada no Apêndice A.

trabalhos relacionados à solução de LDFAI, apresentados neste Capítulo, permitem dimensionar a importância e complexidade do assunto abordado. A partir das observações e ponderações sobre as técnicas de LDFAI existentes, é possível verificar que ainda não há uma formulação determinística capaz de relacionar os sinais de tensão e corrente medidos em um terminal com a distância da falta e considerando um modelo de FAI típico dos SDP. Ainda, existem lacunas a serem preenchidas nas soluções dos problemas relacionados à LDFAI e que, de alguma forma, é possível contribuir para o avanço do estado da arte. Desta forma, no Capítulo seguinte é apresentada a técnica de LDFAI em linhas de distribuição proposta nesta tese.

5 MÉTODO PROPOSTO PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DA FALTA

Os Capítulos anteriores apresentaram, de forma geral, o estado da arte referente à LDF em SDP, modelos de FAI e diferentes abordagens para realizar a LDFAI, segundo uma seleção de trabalhos disponíveis na literatura. Isto serve para mostrar de forma compreensiva a problemática relacionada com o escopo do presente trabalho e permite focar a atenção nos problemas a serem resolvidos, no que diz respeito ao desenvolvimento de um método para LDFAI a um terminal. Frente a existência de vários modelos de FAI, em que cada um foi concebido para representar certas características observadas, é necessário fixar um marco de referência ao presente trabalho escolhendo algum destes modelos. Assim, foi adotado o modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990) para desenvolver o trabalho.

Neste Capítulo é apresentada uma nova técnica de LDFAI utilizando medições a um terminal e que considera, entre outros aspectos, a representação do SEP em componentes de fase. A abordagem proposta consiste em estimar os parâmetros do modelo da FAI, junto com a distância da falta, mediante um modelo desenvolvido no domínio do tempo, e técnicas de estimação de parâmetros. O resultado final é a estimativa da distância da falta em uma linha de transmissão com fluxo de potência radial, com possibilidade de ser aplicada nos diferentes trechos de um SDEE. Como o modelo de FAI apresenta uma relação não linear entre a tensão e a corrente, a formulação foi concebida no domínio do tempo. Portanto, todos os sinais considerados a partir deste ponto são digitais e obtidos mediante uma frequência de amostragem preestabelecida.

Na primeira parte do Capítulo, a técnica para LDFAI é formulada primeiramente para uma linha de transmissão monofásica. Posteriormente, as extensões para linhas trifásica são obtidas mediante uma extensão natural do sistema monofásico, onde os parâmetros são considerados como matrizes. Na segunda parte são expostas as questões práticas referentes à implementação da técnica e a consideração da capacitância.

5.1 FORMULAÇÃO PROPOSTA PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DA FALTA

Toda formulação para localizar faltas com sinais provenientes de um terminal requer que sejam assumidos um modelo de falta e um modelo de linha de transmissão. Historicamente e independentemente do modelo de linha de transmissão adotado, os métodos para LDF foram desenvolvidos sob a consideração de que a falta se comporta como uma resistência linear e constante, cuja magnitude é baixa quando comparada com as impedâncias do sistema elétrico em questão. Como foi explicado na Seção 2.3 deste trabalho, esta consideração representa a

principal limitação dos métodos a um terminal, pois a FAI não se comporta como uma resistência linear. Neste contexto, para poder formular uma proposta de LDFAI, baseada em medições a um terminal, é necessário definir com antecedência o modelo matemático de falta que será considerado.

O modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990) apresenta uma grande simplicidade tanto do ponto de vista analítico como do numérico. Ainda, permite modelar adequadamente a FAI sob condições nominais do SEP, por conseguinte, foi o modelo considerado para desenvolver a metodologia proposta de LDFAI. Este tipo de modelo pertence aos modelos denominados como de diodos antiparalelos (ZAMANAN; SYKULSKI, 2014), considerado também em outros trabalhos como Ibrahim et. al. (2010) e Sheng e Rovnyak (2004). O modelo proposto por Emanuel et al. (1990) é apresentado novamente na Figura 5.1.

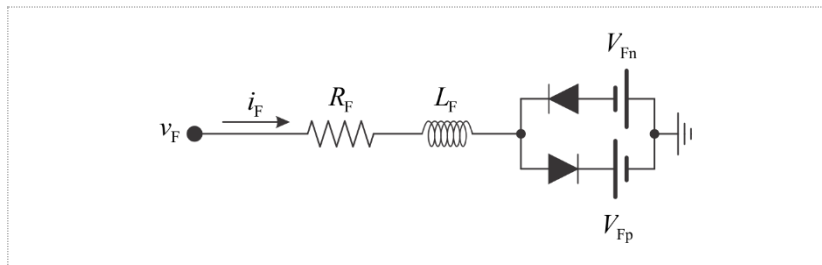


Figura 5.1 - Modelo de FAI em diodos em antiparalelo.
Fonte: (EMANUEL et al., 1990).

Tal como na formulação dos métodos clássicos para LDF, primeiramente é deduzida uma expressão que relaciona à tensão no ponto de falta em função da corrente de falta, a qual vem dada pelo modelo da falta. Neste contexto e analisando a Figura 5.1 em termos da lei das tensões de Kirchhoff, é possível escrever a seguinte relação matemática:

$$v_F = R_F i_F + L_F i'_F + V_{Fp} \text{sgp}(i_F) + V_{Fn} \text{sgn}(i_F), \quad (5.1)$$

A expressão (5.1) indica que a tensão produzida no ponto da falta v_F , devida ao fluxo da corrente de falta i_F [A], está composta pela queda de tensão na componente resistiva da falta R_F [Ω], a queda de tensão na componente indutiva da falta L_F [H] e pela tensão de arco correspondente ao semiciclo positivo da corrente de falta V_{Fp} [V] (tensão de arco positiva) ou, correspondente ao semiciclo negativo da corrente de falta V_{Fn} [V] (tensão de arco negativa). Com se mostra na Figura 5.1, as duas tensões são representadas por fontes de tensão contínua que são ativadas e desativadas mediante diodos, segundo o sentido da corrente de falta. Tais diodos são representados pelas seguintes funções:

$$\text{sgp}(i_F) = \begin{cases} 1, & i_F > 0 \\ 0, & i_F \leq 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

e

$$\text{sgn}(i_F) = \begin{cases} 0, & i_F \geq 0 \\ -1, & i_F < 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Tendo definido o modelo da FAI e a relação entre a tensão e a corrente de falta, é possível aplicar a equação (5.1) a um modelo de linha de transmissão e derivar um modelo para o SDEE em falta.

O SDEE está composto por diferentes trechos interconectados e formados por linhas de transmissão, tais trechos podem ser denominados como linhas de distribuição. Um trecho do sistema de distribuição pode ser entendido segundo o diagrama unifilar da Figura 5.2.

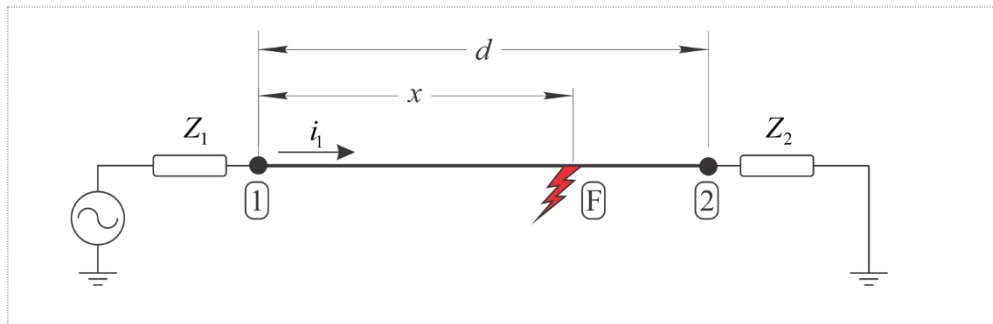


Figura 5.2 - Diagrama unifilar do modelo de linha e uma falta no ponto F.
Fonte: O autor (2016).

No terminal 1 é colocada uma fonte equivalente de Thevenin para representar o lado da proveniência do fluxo de energia no sistema, no terminal 2 se encontra uma impedância equivalente que representa à carga do sistema a jusante deste nó. O objetivo a partir deste ponto, e no contexto da Figura 5.2, consiste em desenvolver um modelo matemático do SDEE em falta, que permita a aplicação de técnicas de estimação em função de medições e dados disponíveis. Para isto, são considerados como dados conhecidos:

- os sinais de tensão e corrente no terminal 1;
- a resistência, a indutância e a capacitância por unidade de comprimento da linha de transmissão.

Também, assume-se que é possível estimar:

- as derivadas dos sinais medidos;
- a corrente de falta, i_F .

Finalmente, como incógnitas a serem resolvidas:

- a distância da falta x ;
- os parâmetros do modelo de FAI assumido (Figura 5.1), R_F , L_F , V_{Fp} e V_{Fn} .

Como será explicado posteriormente, não é possível evitar a estimação dos parâmetros do modelo de FAI em conjunto com a distância da falta. Esta questão apresenta uma vantagem, pois a existência destes parâmetros pode ser um indicativo de que o evento analisado é uma

FAI e não outro evento. A estimação destes parâmetros pode servir para propor métodos de detecção e classificação de FAI. Este assunto tão importante será analisado mediante estudos de caso propostos para este fim no Capítulo 7.

O modelo de linha de transmissão utilizado para representar o trecho que conecta o terminal 1 com o ponto da falta se mostra na Figura 5.3 e consiste em um modelo π de parâmetros concentrados. Este é o modelo tipicamente utilizado quando as linhas envolvidas são curtas e permite propor equações mais simples quando comparadas com os modelos de linhas de transmissão com parâmetros distribuídos.

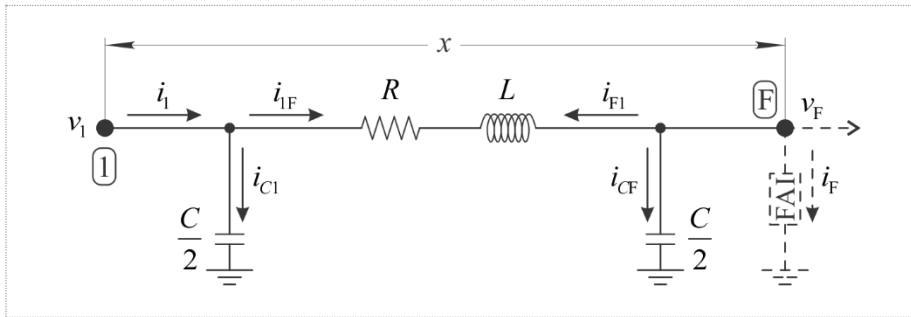


Figura 5.3 - Modelo de linha de transmissão.
Fonte: O autor (2016).

As variáveis apresentadas na Figura 5.3 são assim definidas:

- v_1 : tensão medida no terminal 1 [V];
- i_1 : corrente medida no terminal 1 [A];
- i_{1F} : corrente no ramo série da linha de transmissão que vai do terminal 1 até o ponto F (ponto da falta) [A] ($i_{1F} = -i_{F1}$);
- i_{C1} : corrente capacitiva no terminal 1 e o ponto F [A];
- v_F : tensão no ponto da falta [V];
- i_F : corrente de falta [A];
- x : distância desde o terminal 1 até a falta [m];
- R : resistência série da linha de transmissão por unidade de comprimento [Ω/m];
- L : indutância série da linha de transmissão por unidade de comprimento [H/m];
- C : Capacitância paralela da linha de transmissão por unidade de comprimento [F/m].

O passo seguinte consiste em relacionar as quantidades conhecidas com a distância da falta e os parâmetros do modelo considerado de FAI. Inicialmente, as equações são desenvolvidas para um sistema monofásico, sendo posteriormente estendidas para um sistema

trifásico e considerando faltas monofásicas a terra. Sendo assim, o circuito da Figura 5.3 é analisado sob a lei das tensões de Kirchhoff, resultando na seguinte equação para a tensão no terminal 1:

$$v_1 = x(Ri_{1F} + Li'_{1F}) + v_F, \quad (5.4)$$

onde o apóstrofe sobre o sinal significa a derivada primeira do sinal em função do tempo. O seguinte passo consiste em escrever a equação (5.4) em função da corrente efetivamente medida no terminal 1, i_1 . Sabendo que a corrente capacitiva é diretamente proporcional à capacitância da linha e à derivada da tensão v_1 em função do tempo, tem-se que:

$$i_{C1} = \frac{1}{2} x C v'_1, \quad (5.5)$$

onde a capacitância unitária foi multiplicada pela distância até a falta x para obter a capacitância total entre o terminal 1 e o ponto F. Considerando a expressão (5.5) e a lei das correntes de Kirchhoff, a corrente i_{1F} pode ser expressa como:

$$i_{1F} = i_1 - \frac{1}{2} x C v'_1, \quad (5.6)$$

que substituída na (5.4) resulta em:

$$v_1 = xR\left(i_1 - \frac{1}{2} x C v'_1\right) + xL\left(i'_1 - \frac{1}{2} x C v''_1\right) + v_F. \quad (5.7)$$

A equação (5.1), que representa o modelo de FAI, pode ser substituída na equação (5.7), resultando na seguinte expressão:

$$v_1 = x(Ri_1 + Li'_1) + R_F i_F + L_F i'_F + V_{Fp} \text{sgp}(i_F) + V_{Fn} \text{sgn}(i_F) - \frac{1}{2} x^2 (RC v'_1 + LC v''_1). \quad (5.8)$$

Por conveniência, é possível rescrever a equação (5.8) na seguinte forma matricial:

$$v_1 = \begin{bmatrix} x & R_F & L_F & V_{Fp} & V_{Fn} & x^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_s & i_F & i'_F & \text{sgp}(i_F) & \text{sgn}(i_F) & v_{sh} \end{bmatrix}^T, \quad (5.9)$$

onde:

$$v_s = (Ri_1 + Li'_1); \quad (5.10)$$

$$v_{sh} = \frac{1}{2} (-RCv'_1 - LCv''_1). \quad (5.11)$$

É importante salientar que a equação (5.9) resulta no escalar v_1 , que a primeira matriz do lado direito tem dimensão 1×6 e que a segunda matriz do lado direito possui uma dimensão 6×1 . Isto significa que a equação (5.9) é escrita apenas para um instante de tempo em particular, em

que v_s , i_F e v_{sh} representam uma amostra em particular. Ainda, é conveniente continuar o desenvolvimento matemático utilizando a transposta da equação (5.9), a qual resulta em:

$$v_1 = \begin{bmatrix} v_s & i_F & i'_F & \text{sgp}(i_F) & \text{sgn}(i_F) & v_{sh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x & R_F & L_F & V_{Fp} & V_{Fn} & x^2 \end{bmatrix}^T. \quad (5.12)$$

A expressão (5.12) representa o modelo matemático do SDEE em falta, utilizado para realizar a estimativa da distância da falta. Neste ponto é importante salientar que a distância da falta é uma constante e que os parâmetros R_F , L_F , V_{Fp} e V_{Fn} são considerados constantes durante o período analisado. Não obstante, esta consideração não é exatamente real no primeiro período depois do início da FAI, quando ocorre o fenômeno de *buildup* (SANTOS et al., 2013). Entretanto, o fenômeno de *shoulder* é caracterizado por valores temporariamente constantes dos parâmetros da FAI e, após alguns ciclos a falta tende a se estabilizar. Por este motivo, os parâmetros da falta são assumidos como constantes na formulação proposta.

Na equação (5.12) é possível verificar a existência de cinco incógnitas, x , R_F , L_F , V_{Fp} e V_{Fn} . Por conseguinte, são necessárias no mínimo cinco amostras dos sinais envolvidos para poder resolver esta equação. Visando generalizar o desenvolvimento, é considerado um conjunto de $N > 5$ amostras, onde cada amostra está identificada com um número ordinal. Deste modo, a expressão (5.12) pode ser repetida N vezes para formar o seguinte sistema de equações, que será sobredeterminado no caso de $N > 5$:

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} \\ v_{1,2} \\ \vdots \\ v_{1,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s,1} & i_{F,1} & i'_{F,1} & \text{sgp}(i_{F,1}) & \text{sgn}(i_{F,1}) & v_{sh,1} \\ v_{s,2} & i_{F,2} & i'_{F,2} & \text{sgp}(i_{F,2}) & \text{sgn}(i_{F,2}) & v_{sh,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{s,N} & i_{F,N} & i'_{F,N} & \text{sgp}(i_{F,N}) & \text{sgn}(i_{F,N}) & v_{sh,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_F \\ L_F \\ V_{Fp} \\ V_{Fn} \\ x^2 \end{bmatrix}, \quad (5.13)$$

onde o número subscrito, depois da vírgula, indica o número ordinal da amostra considerada dentro do conjunto de N amostras previamente selecionadas. A equação (5.13) constitui uma expressão matemática simples e muito elegante, no entanto apresenta três dificuldades importantes a serem resolvidas:

- a distância da falta aparece elevada ao quadrado na última linha da matriz de parâmetros (segunda matriz no membro direito);
- a corrente de falta deve ser estimada;
- deve ser definido um critério para escolher o conjunto de N amostras.

O inconveniente de ter a distância elevada ao quadrado impacta diretamente na forma de estimar as incógnitas no sistema de equações (5.13). A aparição do quadrado da distância da falta, em princípio, não permite aplicar técnicas lineares para resolver este tipo de problemas,

as quais se mostram muito eficientes. Entretanto, consideram-se linhas de transmissão aéreas e um valor desprezível da capacitância em comparação com as resistências e indutâncias pode ser considerado. Neste contexto, o sinal v_{sh} dado pela equação (5.11) é desprezível em relação aos outros sinais e, a última coluna da equação (5.13) pode ser desconsiderada. Tal suposição permite reescrever a relação (5.13) como:

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} \\ v_{1,2} \\ \vdots \\ v_{1,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s,1} & i_{F,1} & i'_{F,1} & \text{sgp}(i_{F,1}) & \text{sgn}(i_{F,1}) \\ v_{s,2} & i_{F,2} & i'_{F,2} & \text{sgp}(i_{F,2}) & \text{sgn}(i_{F,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{s,N} & i_{F,N} & i'_{F,N} & \text{sgp}(i_{F,N}) & \text{sgn}(i_{F,N}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_F \\ L_F \\ V_{Fp} \\ V_{Fn} \end{bmatrix}. \quad (5.14)$$

A equação (5.14) agora mostra uma relação linear entre os parâmetros da FAI, os sinais de tensão medida no terminal 1 e os sinais v_s , i_F , $\text{sgp}(i_F)$ e $\text{sgn}(i_F)$. As propostas para estimar a corrente de falta e para escolher o conjunto de amostras serão abordadas mais a frente, na subsecção que trata sobre a implementação da formulação para LDFAI.

Uma consideração razoável para a estimativa das incógnitas na expressão (5.14) é reconhecer que existe um resíduo associado, representando certo ruído branco que não pode ser modelado pelo modelo FAI adotado (AGUIRRE, 2007). Portanto, será adicionado um novo vetor à equação (5.14) para representar este resíduo, reformulando esta expressão como:

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} \\ v_{1,2} \\ \vdots \\ v_{1,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s,1} & i_{F,1} & i'_{F,1} & \text{sgp}(i_{F,1}) & \text{sgn}(i_{F,1}) \\ v_{s,2} & i_{F,2} & i'_{F,2} & \text{sgp}(i_{F,2}) & \text{sgn}(i_{F,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{s,N} & i_{F,N} & i'_{F,N} & \text{sgp}(i_{F,N}) & \text{sgn}(i_{F,N}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_F \\ L_F \\ V_{Fp} \\ V_{Fn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_N \end{bmatrix}, \quad (5.15)$$

onde ξ_i , para $i = 1, 2, \dots, N$, representa as amostras do vetor de resíduos. Visando simplificar e generalizar a notação, a relação (5.15) pode ser expressa na seguinte forma compacta:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\xi}, \quad (5.16)$$

onde é possível verificar que:

$$\mathbf{y} = [v_{1,1} \quad v_{1,2} \quad \cdots \quad v_{1,N}]^T, \quad (5.17)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} v_{s,1} & i_{F,1} & i'_{F,1} & \text{sgp}(i_{F,1}) & \text{sgn}(i_{F,1}) \\ v_{s,2} & i_{F,2} & i'_{F,2} & \text{sgp}(i_{F,2}) & \text{sgn}(i_{F,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{s,N} & i_{F,N} & i'_{F,N} & \text{sgp}(i_{F,N}) & \text{sgn}(i_{F,N}) \end{bmatrix}, \quad (5.18)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [x \quad R_F \quad L_F \quad V_{Fp} \quad V_{Fn}]^T, \quad (5.19)$$

e

$$\xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_N]^T. \quad (5.20)$$

A equação (5.16) possui a estrutura de um sistema de equações lineares, cujas incógnitas se encontram no vetor de parâmetros θ e pode ser resolvida, em primeira instância, com o EMQ lineares (AGUIRRE, 2007). Neste contexto, \mathbf{X} é a matriz de regressores, e ξ o vetor de resíduos. O objetivo do EMQ consiste em minimizar a norma quadrática do resíduo, identificada como J_θ , em função dos parâmetros θ :

$$J_\theta = \xi^T \xi. \quad (5.21)$$

Por fim, a solução de (5.21) resulta em uma expressão algébrica simples:

$$\hat{\theta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (5.22)$$

O “chapéu” sobre o vetor θ na equação (5.22) indica que estes são parâmetros estimados e não parâmetros reais. Uma revisão sucinta do EMQ pode ser encontrada no Apêndice A: e as propriedades deste estimador são expostas em uma forma clara e concisa em (AGUIRRE, 2007, p. 249).

5.1.1 Extensão da formulação proposta para linhas trifásicas

A expressão (5.22) apresenta a solução de (5.15) para estimar os parâmetros da FAI junto com a distância da falta em uma linha monofásica. As equações para um sistema trifásico surgem de forma natural ao considerar o modelo do segmento de linha de transmissão trifásica da Figura 5.4.

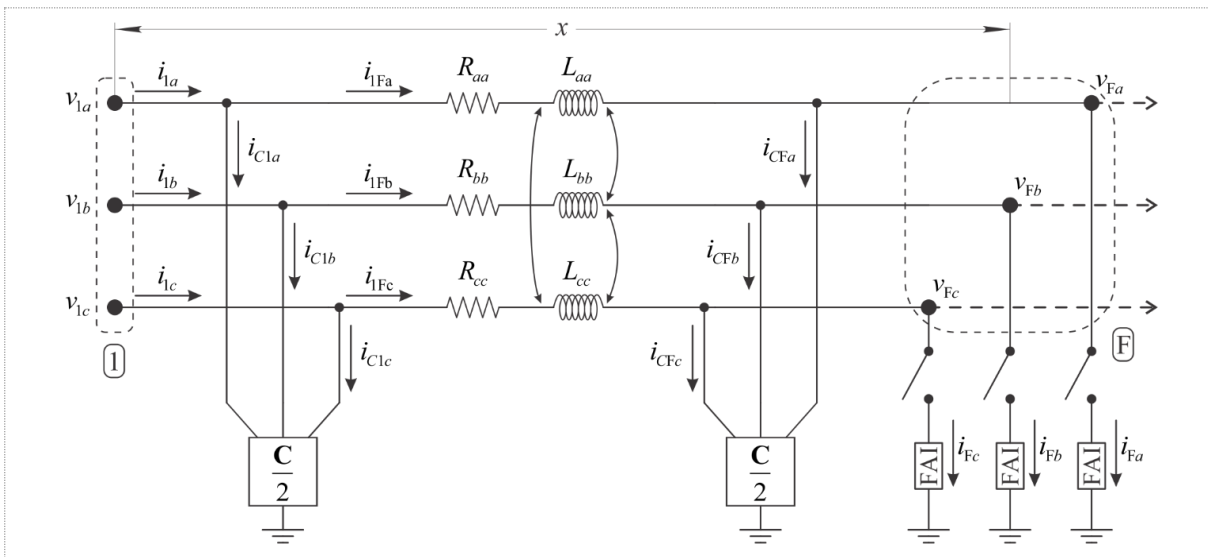


Figura 5.4 - Modelo de linha de transmissão trifásica.
Fonte: O autor (2016).

Neste contexto, todos os sinais de tensão e corrente da equação (5.8) são substituídos por vetores de dimensão 3 e os parâmetros por matrizes de dimensão 3 x 3. A equação fundamental (5.8) é reescrita com os seus termos em negrito, para indicar quantidades matriciais:

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{x}(\mathbf{R}\mathbf{i}_1 + \mathbf{L}\mathbf{i}'_1) + \mathbf{R}_F \mathbf{i}_F + \mathbf{L}_F \mathbf{i}'_F + \mathbf{V}_{Fp} \text{sgn}(\mathbf{i}_F) + \mathbf{V}_{Fn} \text{sgn}(\mathbf{i}_F) - \frac{1}{2} \mathbf{x}^2 (\mathbf{R}\mathbf{C}\mathbf{v}'_1 + \mathbf{L}\mathbf{C}\mathbf{v}''_1). \quad (5.23)$$

É possível verificar que os sinais de tensão e corrente, em um determinado instante, agora são vetores com a seguinte estrutura:

$$\mathbf{v}_1 = [v_{1a} \quad v_{1b} \quad v_{1c}]^T, \quad (5.24)$$

$$\mathbf{i}_1 = [i_{1a} \quad i_{1b} \quad i_{1c}]^T, \quad (5.25)$$

e

$$\mathbf{i}_F = [i_{Fa} \quad i_{Fb} \quad i_{Fc}]^T. \quad (5.26)$$

Os parâmetros da linha são matrizes, compostas pelos parâmetros próprios de cada fase e mútuos entre fases:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix}, \quad (5.27)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}, \quad (5.28)$$

e

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix}. \quad (5.29)$$

Na literatura técnica, não são registrados modelos de FAI para faltas entre fases ou mais de uma fase à terra. Portanto, os parâmetros matriciais da FAI são escritos sem acoplamentos entre as fases:

$$\mathbf{R}_F = \begin{bmatrix} R_{Fa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{Fb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{Fc} \end{bmatrix}, \quad (5.30)$$

$$\mathbf{L}_F = \begin{bmatrix} L_{Fa} & 0 & 0 \\ 0 & L_{Fb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{Fc} \end{bmatrix}, \quad (5.31)$$

$$\mathbf{V}_{Fp} = \begin{bmatrix} V_{Fpa} & 0 & 0 \\ 0 & V_{Fpb} & 0 \\ 0 & 0 & V_{Fpc} \end{bmatrix}, \quad (5.32)$$

e

$$\mathbf{V}_{Fn} = \begin{bmatrix} V_{Fna} & 0 & 0 \\ 0 & V_{Fnb} & 0 \\ 0 & 0 & V_{Fnc} \end{bmatrix}. \quad (5.33)$$

Finalmente, a distância da falta deve tomar forma de matriz para assim manter a consistência da equação (5.23):

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & x \end{bmatrix}. \quad (5.34)$$

Neste ponto é importante esclarecer que como são consideradas apenas faltas entre uma fase e a terra, a corrente de falta nas fases sãs são iguais a zero.

Estendendo o desenvolvimento de forma análoga ao da linha monofásica, o equivalente da equação (5.12) para o sistema trifásico pode ser escrito como:

$$\mathbf{v}_1^T = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s^T & \mathbf{i}_F^T & \mathbf{i}_F^T & \text{sgp}(\mathbf{i}_F^T) & \text{sgn}(\mathbf{i}_F^T) & \mathbf{v}_{sh}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{R}_F & \mathbf{L}_F & \mathbf{V}_{Fp} & \mathbf{V}_{Fn} & \mathbf{x}^2 \end{bmatrix}^T, \quad (5.35)$$

onde:

$$\mathbf{v}_s = \begin{bmatrix} v_{sa} & v_{sb} & v_{sc} \end{bmatrix}^T, \quad (5.36)$$

$$\mathbf{v}_{sh} = \begin{bmatrix} v_{sha} & v_{shb} & v_{shc} \end{bmatrix}^T \quad (5.37)$$

e

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ab} & R_b & R_{bc} \\ R_{ac} & R_{bc} & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{sa} \\ i'_{sb} \\ i'_{sc} \end{bmatrix}, \quad (5.38)$$

$$\begin{bmatrix} v_{shc} \\ v_{shc} \\ v_{shc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_a & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ab} & R_b & R_{bc} \\ R_{ac} & R_{bc} & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ab} & C_b & C_{bc} \\ C_{ac} & C_{bc} & C_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_{sha} \\ v'_{shb} \\ v'_{shc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ab} & C_b & C_{bc} \\ C_{ac} & C_{bc} & C_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v''_{sha} \\ v''_{shb} \\ v''_{shc} \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

Visando apresentar o equacionamento com total clareza, o análogo trifásico da equação (5.15) para um conjunto de N amostras pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1,1}^T \\ \mathbf{v}_{1,2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{1,N}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{s,1}^T & \mathbf{i}_{F,1}^T & \mathbf{i}'_{F,1} & \text{sgp}(\mathbf{i}_{F,1}^T) & \text{sgn}(\mathbf{i}_{F,1}^T) & \mathbf{v}_{sh,1}^T \\ \mathbf{v}_{s,2}^T & \mathbf{i}_{F,2}^T & \mathbf{i}'_{F,2} & \text{sgp}(\mathbf{i}_{F,2}^T) & \text{sgn}(\mathbf{i}_{F,2}^T) & \mathbf{v}_{sh,2}^T \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{v}_{s,N}^T & \mathbf{i}_{F,N}^T & \mathbf{i}'_{F,N} & \text{sgp}(\mathbf{i}_{F,N}^T) & \text{sgn}(\mathbf{i}_{F,N}^T) & \mathbf{v}_{sh,N}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{R}_F \\ \mathbf{L}_F \\ \mathbf{V}_{Fp} \\ \mathbf{V}_{Fn} \\ \mathbf{x}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.40)$$

Com o intuito de facilitar o entendimento da estrutura da equação (5.40), sua forma expandida é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_{1a,1} & v_{1b,1} & v_{1c,1} \\ v_{1a,2} & v_{1b,2} & v_{1c,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{1a,N} & v_{1b,N} & v_{1c,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa,1} & v_{sb,1} & v_{sc,1} & i_{Fa,1} & i_{Fb,1} & i_{Fc,1} \\ v_{sa,2} & v_{sb,2} & v_{sc,2} & i_{Fa,2} & i_{Fb,2} & i_{Fc,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{sa,N} & v_{sb,N} & v_{sc,N} & i_{Fa,N} & i_{Fb,N} & i_{Fc,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_{Fa,1} & i'_{Fb,1} & i'_{Fc,1} & \text{sgp}(i_{Fa,1}) & \text{sgp}(i_{Fb,1}) & \text{sgp}(i_{Fc,1}) & \text{sgn}(i_{Fa,1}) & \text{sgn}(i_{Fb,1}) \\ i'_{Fa,2} & i'_{Fb,2} & i'_{Fc,2} & \text{sgp}(i_{Fa,2}) & \text{sgp}(i_{Fb,2}) & \text{sgp}(i_{Fc,2}) & \text{sgn}(i_{Fa,2}) & \text{sgn}(i_{Fb,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i'_{Fa,N} & i'_{Fb,N} & i'_{Fc,N} & \text{sgp}(i_{Fa,N}) & \text{sgp}(i_{Fb,N}) & \text{sgp}(i_{Fc,N}) & \text{sgn}(i_{Fa,N}) & \text{sgn}(i_{Fb,N}) \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

$$\begin{bmatrix} \text{sgn}(i_{Fc,1}) & v_{sha,1} & v_{shb,1} & v_{shc,1c} \\ \text{sgn}(i_{Fc,2}) & v_{sha,2} & v_{shb,2} & v_{shc,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{sgn}(i_{Fc,N}) & v_{sha,N} & v_{shb,N} & v_{shc,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & R_{Fa} & 0 & 0 & L_{Fa} & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & R_{Fb} & 0 & 0 & L_{Fb} & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 & R_{Fc} & 0 & 0 & L_{Fc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{Fpa} & 0 & 0 & V_{Fna} & 0 & 0 & x^2 & 0 & 0 \\ 0 & V_{Fpb} & 0 & 0 & V_{Fnb} & 0 & 0 & x^2 & 0 \\ 0 & 0 & V_{Fpc} & 0 & 0 & V_{Fnc} & 0 & 0 & x^2 \end{bmatrix}^T$$

Para exemplificar, considere uma falta fase-terra na fase a . Neste contexto, a estimativa da distância da falta juntamente com os parâmetros da FAI, deve ser feita com as colunas da equação (5.41) que correspondem à fase a . Para uma falta deste tipo, a equação a ser resolvida é:

$$\begin{bmatrix} v_{1a,1} \\ v_{1a,2} \\ \vdots \\ v_{1a,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa,1} & i_{Fa,1} & i'_{Fa,1} & \text{sgp}(i_{Fa,1}) & \text{sgn}(i_{Fa,1}) & v_{sha,1} \\ v_{sa,2} & i_{Fa,2} & i'_{Fa,2} & \text{sgp}(i_{Fa,2}) & \text{sgn}(i_{Fa,2}) & v_{sha,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{sa,N} & i_{Fa,N} & i'_{Fa,N} & \text{sgp}(i_{Fa,N}) & \text{sgn}(i_{Fa,N}) & v_{sha,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \\ L_{Fa} \\ V_{Fpa} \\ V_{Fna} \\ x^2 \end{bmatrix} \quad (5.42)$$

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA

Na secção anterior foi apresentada a formulação da equação (5.40), cuja resolução é parte da proposta para LDFAI. Entretanto, o desenvolvimento foi realizado com um carácter puramente teórico sem que tenham sido abordadas questões relativas à sua implementação computacional. Questões como a estimação da corrente de falta, derivação numérica dos sinais e a escolha do conjunto de amostras para aplicar o EMQ são descritos nesta secção.

5.2.1 Estimação da corrente de falta

Uma questão de primordial importância presente em todos os métodos de LDF a um terminal é a necessidade de estimar a corrente de falta. Como as FAI são principalmente faltas fase-terra, faz sentido utilizar a diferença entre a corrente residual de falta e a corrente residual de pré-falta como uma estimativa da corrente de falta, abordagem similar à proposta em (ALAMUTI et al., 2012). Como os sinais são considerados no domínio do tempo, a diferença deve ser calculada entre as amostras correspondentes de ciclos passados, como exemplifica a Figura 5.5. A realização deste procedimento é implementada mediante um filtro digital de diferença entre ciclos.

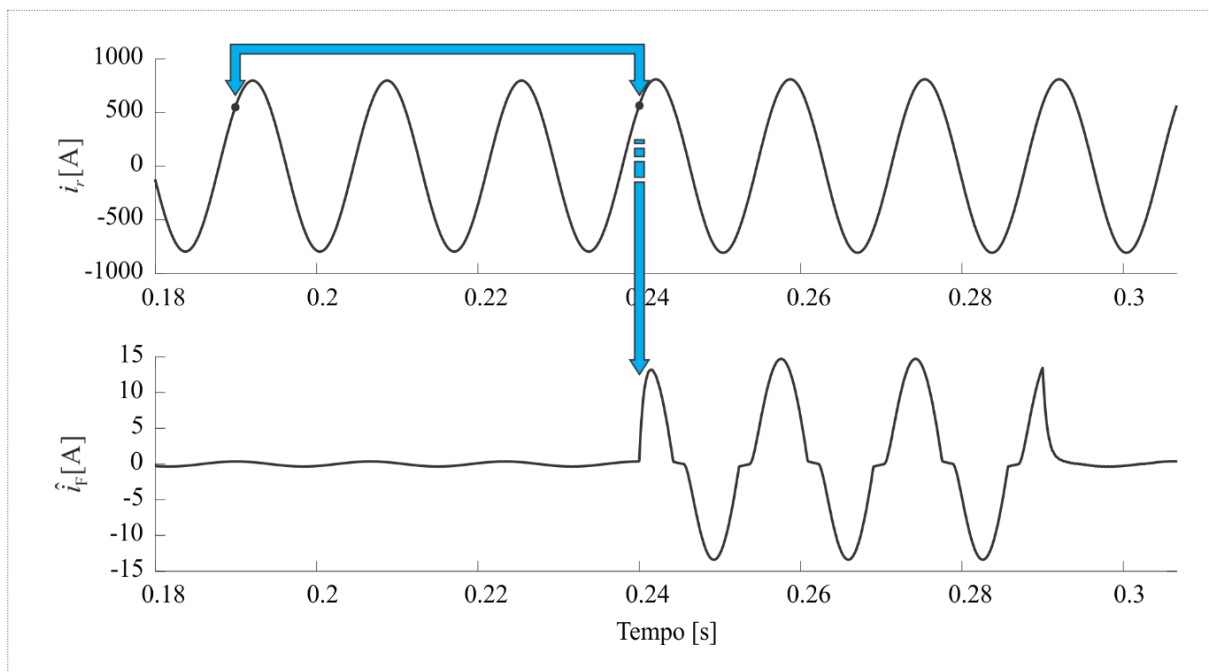


Figura 5.5 - Modelo de linha de transmissão trifásica, onde i_r é a corrente residual e \hat{i}_f é a corrente estimada da falta.

Fonte: O autor (2016).

5.2.2 Estimação numéricas das derivadas

Para realizar a estimativa da distância da falta, é necessário conhecer as derivadas temporais de certos sinais, sendo necessário definir algum método para sua estimação. Por este motivo foram estudados vários métodos de estimação de derivadas e foi selecionado o que apresentou um melhor desempenho. A técnica selecionada consiste na aproximação do sinal por um polinômio, dentro de uma janela móvel de tempo curto, utilizando o EMQ (AGUIRRE, 2007). Por fim, utiliza-se a derivada analítica do sinal estimado como aproximação da derivada do sinal em questão.

Sendo $y(n)$ uma amostra do sinal em questão, dada no instante identificado com o número n , assume-se que esta amostra pode ser aproximada mediante o seguinte polinômio em função de n :

$$y(n) = \alpha_0 + \alpha_1 n + \dots + \alpha_{K-1} n^{K-1} + \alpha_K n^K + e(n), \quad n_{in} \leq n \leq n_{fn}. \quad (5.43)$$

Onde K é a ordem do polinômio, os α_k são coeficientes a serem determinados, $e(n)$ é o erro de regressão e n_{in}, n_{fn} são os índices que correspondem às amostras inicial e final da janela de dados considerada e, onde a aproximação está sendo realizada. Por conseguinte, dentro da janela definida por $n_{in} \leq n \leq n_{fn}$, é possível escrever a seguinte relação matricial:

$$\begin{bmatrix} y(n_{in}) \\ \vdots \\ y(n_{fn}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & n_{in} & \cdots & n_{in}^{k-1} & n_{in}^k \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 1 & n_{fn} & \cdots & n_{fn}^{k-1} & n_{fn}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{K-1} \\ \alpha_K \end{bmatrix} + \mathbf{e}. \quad (5.44)$$

É possível ver que a equação (5.44) é linear em relação aos coeficientes α_k , onde $k = 1, 2, \dots, K$, podendo ser escrita na seguinte forma compacta:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{e}. \quad (5.45)$$

É possível verificar que a equação (5.45) pode ser resolvida mediante o EMQ apresentado na equação (5.22), estimando assim os coeficientes do polinômio definido em (5.43). Uma condição necessária para que exista uma solução única da expressão (5.45) em termos do EMQ é que o número de amostras selecionadas deve ser maior a K , expressada como:

$$n_{fn} - n_{in} \geq K + 1. \quad (5.46)$$

Finalmente, sendo estimados os coeficientes α , a primeira e segunda derivadas do sinal podem ser escritas para o instante n_i como:

$$\hat{y}'(n_i) = \hat{\alpha}_1 + \dots + (k-1)\alpha_{k-1}n_i^{k-2} + k\alpha_k n_i^{k-1}, \quad (5.47)$$

$$\hat{y}''(n_i) = \hat{\alpha}_2 + \dots + (k-2)(k-1)\alpha_{k-1}n_i^{k-3} + (k-1)\alpha_k n_i^{k-2}. \quad (5.48)$$

O procedimento de estimação de coeficientes e cálculo das derivadas é repetido para todas as amostras $y(n_{in})$, com $in = 0, 1, 2, \dots, M-1$, onde M é o tamanho do sinal e a diferença $n_{jn} - n_{in} = N_d$, é mantida constante.

5.2.3 Implementação do estimador de mínimos quadrados

Como já foi explicado, a solução em termos do EMQ lineares para o sistema apresentado na equação (5.16):

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (5.49)$$

Com o intuito de explicar de forma clara certas questões, assume-se a seguinte relação:

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad (5.50)$$

A matriz \mathbf{B} é quadrada por construção, e a sua dimensão coincide com o número de colunas de \mathbf{X} . Substituindo (5.50) em (5.49), obtém-se:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (5.51)$$

Para compor a matriz de regressores \mathbf{X} são aplicadas as funções sgp e sgn, descritas pelas equações (5.2) e (5.3), a corrente estimada de falta. Se a corrente de falta é considerada apenas do semiciclo positivo, a coluna cinco da matriz \mathbf{X} estará formada unicamente por zeros. Deste modo, a quinta coluna e quinta linha da matriz \mathbf{B} também estarão formadas unicamente por zeros e tornando-a singular. Neste caso, tanto a coluna cinco de \mathbf{X} quanto o quinto parâmetro do vetor $\boldsymbol{\theta}$ devem ser removidos. A situação equivalente ocorre com a coluna quatro de \mathbf{X} quando é considerado apenas o semiciclo negativo da corrente de falta. O problema da possível singularidade implicaria desenvolver um algoritmo capaz de eliminar as colunas e parâmetros que produzem colunas zeradas em \mathbf{X} e tornando a \mathbf{B} singular. Uma forma elegante e robusta para resolver o problema consiste em utilizar o algoritmo de Decomposição em Valores Singulares (SVD)¹⁵ (ZIEGEL et al., 2007). Este algoritmo permite resolver o sistema de equações de maneira eficiente e robusta, em casos de singularidade ou casos próximos à singularidade.

5.2.4 Cálculo do limiar definido pela corrente de falta

Durante a implementação da técnica proposta, observou-se que a precisão na estimativa da corrente de falta é fortemente influenciada quando esta se encontra próxima à passagem por

¹⁵ Do inglês, *Singular Value Decomposition*.

zero. O uso da corrente de falta estimada nas proximidades da sua passagem por zero provocou uma elevação considerável no erro associado à estimativa da distância da falta. Por esta razão, foi desenvolvido um algoritmo para selecionar amostras de tensão e corrente afastadas da passagem da corrente de falta por zero. Este algoritmo seleciona as amostras correspondentes com a corrente de falta estimada, que excedem um determinado limiar, para assim construir uma matriz diagonal \mathbf{W} composta por pesos determinados para cada uma das amostras em questão. Os pesos das amostras superiores ao limiar são de 1 e os pesos para as amostras que não excedem o limiar são de 0. Desta maneira, o EMQ pode ser implementado com a seguinte expressão, que considera o peso associado a cada amostra:

$$\hat{\theta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{y}. \quad (5.52)$$

O procedimento inicia com a obtenção do valor máximo absoluto da corrente de falta estimada dentro de uma janela de 1,5 ciclos. Este valor é multiplicado por um fator empírico de 0,15 para finalmente obter o limiar. O processo é ilustrado na Figura 5.6, onde são mostradas duas janelas que se deslocam ao longo dos sinais.

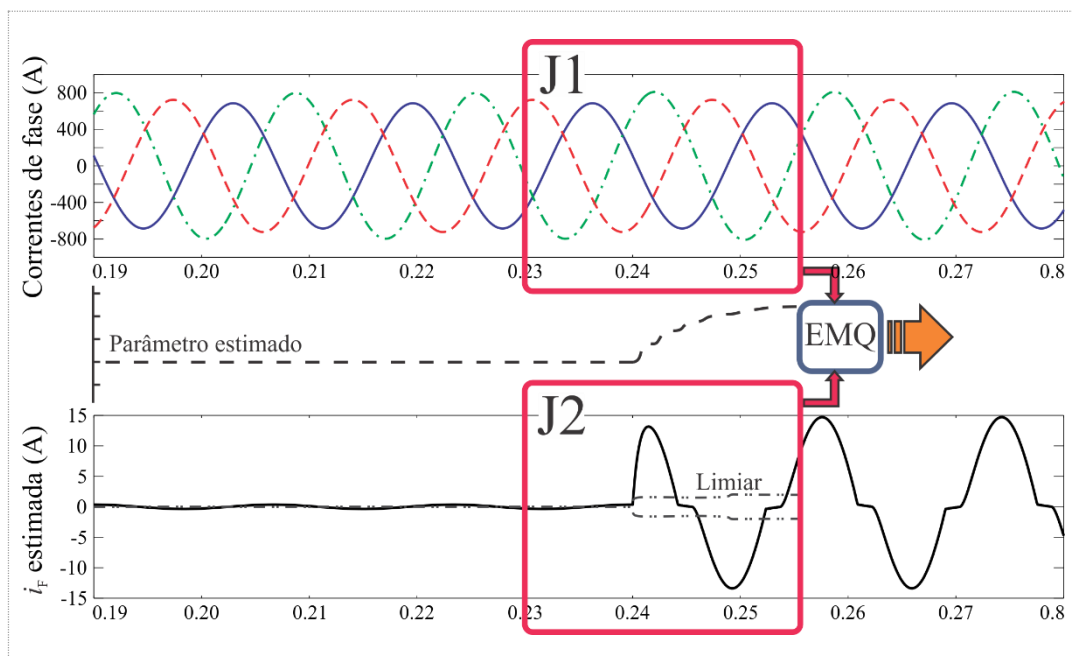


Figura 5.6 - Ilustração da implementação do EMQ.
Fonte: O autor (2016).

A janela J1 indica onde o EMQ é aplicado e a J2 é a janela onde o limiar é obtido. J2 é deslocada à para de J1 e é aplicada à corrente de falta estimada.

5.2.5 Solução Considerando a Capacitância da Linha

A técnica proposta para LDFAI é baseada na resolução da equação (5.13) para o caso de sistema monofásico ou a equação (5.40) no caso de sistema trifásico. Como nestas expressões a distância da falta aparece elevada ao quadrado, as mesmas representam relações não lineares e, a solução mediante EMQL pode ser utilizada unicamente quando a capacitância da linha é desprezada, levando à equação. Para considerar a capacitância é necessário utilizar um método de resolução que permita tratar a não linearidade da equação (5.13) ou (5.40). Visando simplificar a exposição, a seguir será apresentado o equacionamento realizado para o caso monofásico, a partir da equação (5.13). Deste modo, a expressão (5.53) consiste em uma equação equivalente à (5.16), onde a matriz de repressores (\mathbf{X}) é separada em um bloco correspondente à parte linear (\mathbf{X}_L) e em outro bloco correspondente à parte quadrática (\mathbf{X}_Q). O mesmo procedimento é realizado com os parâmetros a serem estimados.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_L & \mathbf{X}_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\theta}} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}.^2 \end{bmatrix} + \boldsymbol{\xi}. \quad (5.53)$$

Na equação (5.53), o ponto antes da potenciação de $\boldsymbol{\theta}$ significa que cada componente da matriz é elevado ao quadrado e não a matriz em si. Os demais membros da equação (5.53) são descritos a seguir:

$$\mathbf{y} = [v_{1,1} \quad v_{1,2} \quad \cdots \quad v_{1,N}]^T, \quad (5.54)$$

$$\mathbf{X}_L = \begin{bmatrix} v_{s,1} & i_{F,1} & i'_{F,1} & \text{sgp}(i_{F,1}) & \text{sgn}(i_{F,1}) \\ v_{s,2} & i_{F,2} & i'_{F,2} & \text{sgp}(i_{F,2}) & \text{sgn}(i_{F,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{s,N} & i_{F,N} & i'_{F,N} & \text{sgp}(i_{F,N}) & \text{sgn}(i_{F,N}) \end{bmatrix}, \quad (5.55)$$

$$\mathbf{X}_Q = \begin{bmatrix} v_{sh,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_{sh,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{sh,N} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.56)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{x} \quad \hat{R}_F \quad \hat{L}_F \quad \hat{V}_{Fp} \quad \hat{V}_{Fn}]^T \quad (5.57)$$

e vetor de resíduos:

$$\boldsymbol{\xi} = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_N]^T. \quad (5.58)$$

O objetivo consiste em minimizar a norma quadrática do resíduo em função dos parâmetros do modelo em questão, sendo estes a distância da falta e os parâmetros da FAI. A diferença em relação ao caso linear é que agora os parâmetros aparecem elevados ao quadrado.

Por este motivo, o método será denominado como o Estimador de Mínimos Quadrados Não Linear (EMQNL). Neste contexto, a norma quadrática do resíduo é escrita como:

$$J_{\theta} = \xi^T \xi, \quad (5.59)$$

Substituindo (5.53) em (5.59)

$$J_{\theta} = \left(\mathbf{y} - [\mathbf{X}_L \quad \mathbf{X}_Q] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\theta}} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}^2 \end{bmatrix} \right)^T \left(\mathbf{y} - [\mathbf{X}_L \quad \mathbf{X}_Q] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\theta}} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}^2 \end{bmatrix} \right) \quad (5.60)$$

Após vários passos algébricos, a equação (5.60) pode ser escrita na seguinte forma expandida:

$$J_{\theta} = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X}_L \hat{\boldsymbol{\theta}} - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}_L^T \mathbf{y} + \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_L \hat{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{y}^T \mathbf{X}_Q \hat{\boldsymbol{\theta}}^2 - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}_Q^T \mathbf{y} + \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_Q \hat{\boldsymbol{\theta}}^2 + \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_L \hat{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_Q \hat{\boldsymbol{\theta}}^2 \quad (5.61)$$

É importante salientar que J_{θ} é um escalar, portanto, cada termo do membro direito na equação (5.61) é também um escalar. Para estimar os parâmetros que a equação (5.61) foi adotado o método de Newton (LUENBERGER; YE, 2008). Este consiste em um método de otimização irrestrita para o qual é necessário definir o gradiente e a matriz Hessiana da função objetivo. Deste modo, utilizando as identidades (D.1) a (D.6) apresentadas no Apêndice C:, é possível obter o gradiente da expressão (5.61):

$$\begin{aligned} \nabla J_{\theta} = & -2\mathbf{X}_L^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_L \hat{\boldsymbol{\theta}} - 4\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{X}_Q^T \mathbf{y} + \\ & 2 \left[2\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_L + \mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_Q \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \right] \hat{\boldsymbol{\theta}} + 4\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_Q \hat{\boldsymbol{\theta}}^2 \end{aligned} \quad (5.62)$$

Utilizando as relações (D.12) a (D.16) do Apêndice C:, aplicadas aos termos da equação (5.62), é possível escrever a matriz Hessiana como:

$$\begin{aligned} \nabla^2 J_{\theta} = & 2\mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_L - 4\text{diag}(\mathbf{X}_Q^T \mathbf{y}) + \\ & 4 \left\{ \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_L + \sum_{j=1}^R \text{diag} \left[(\mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_L)_{.j} \right] \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_j) \right\} + 4\mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_Q \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) + \\ & 4 \left\{ 2\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_Q \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) + \sum_{j=1}^R \text{diag} \left[(\mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_Q)_{.j} \right] \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_j^2) \right\} \end{aligned} \quad (5.63)$$

As definições da função $\text{diag}(\cdot)$ e dos subscritos j e $.j$ são apresentadas no Apêndice C:.

A partir deste ponto, é possível utilizar o método de Newton (LUENBERGER; YE, 2008) para estimar os parâmetros no vetor $\boldsymbol{\theta}$. O algoritmo para implementação deste método é o mesmo descrito na Seção 5.2.3, substituindo o EMQL pelo método de Newton. Sendo assim, o algoritmo que considera a capacitância da linha será denominado com Algoritmo de Mínimos Quadrados Não Linear (AMQNL)

5.3 FLUXOGRAMA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA

A Figura 5.7 apresenta um fluxograma completo que resume a implementação da técnica proposta para LDFAI e estimação dos parâmetros da FAI, conforme apresentado nas seções anteriores. Mediante setas, nesta figura se indica o fluxo que seguem os sinais digitais, as operações aplicadas a estes sinais são indicadas como caixas com textos explicativos que referenciam às seções que explicam as operações. As setas grossas indicam sinais polifásicos ou matrizes e as setas finas indicam sinais monofásicos ou vetores. O sinal \mathbf{y} representa ao l esquerdo da equação (5.40) e \mathbf{X} representa à matriz de regressores, no lado direito da mesma equação. \mathbf{y}_i representa à coluna de \mathbf{y} que corresponde à fase i e \mathbf{X}_i à matriz de regressores depois de ter selecionado a fase em questão. O subscripto J1 indica que os sinais foram multiplicados pela janela J1 descrita na Seção 5.2.4. Na Figura 5.7 se considera que os sinais são atualizados em cada instante e as janelas J1 e J2 são fixas, o que causa o mesmo efeito que considerar aos sinais como vetores fixos e às janelas como móveis sobre os mesmos.

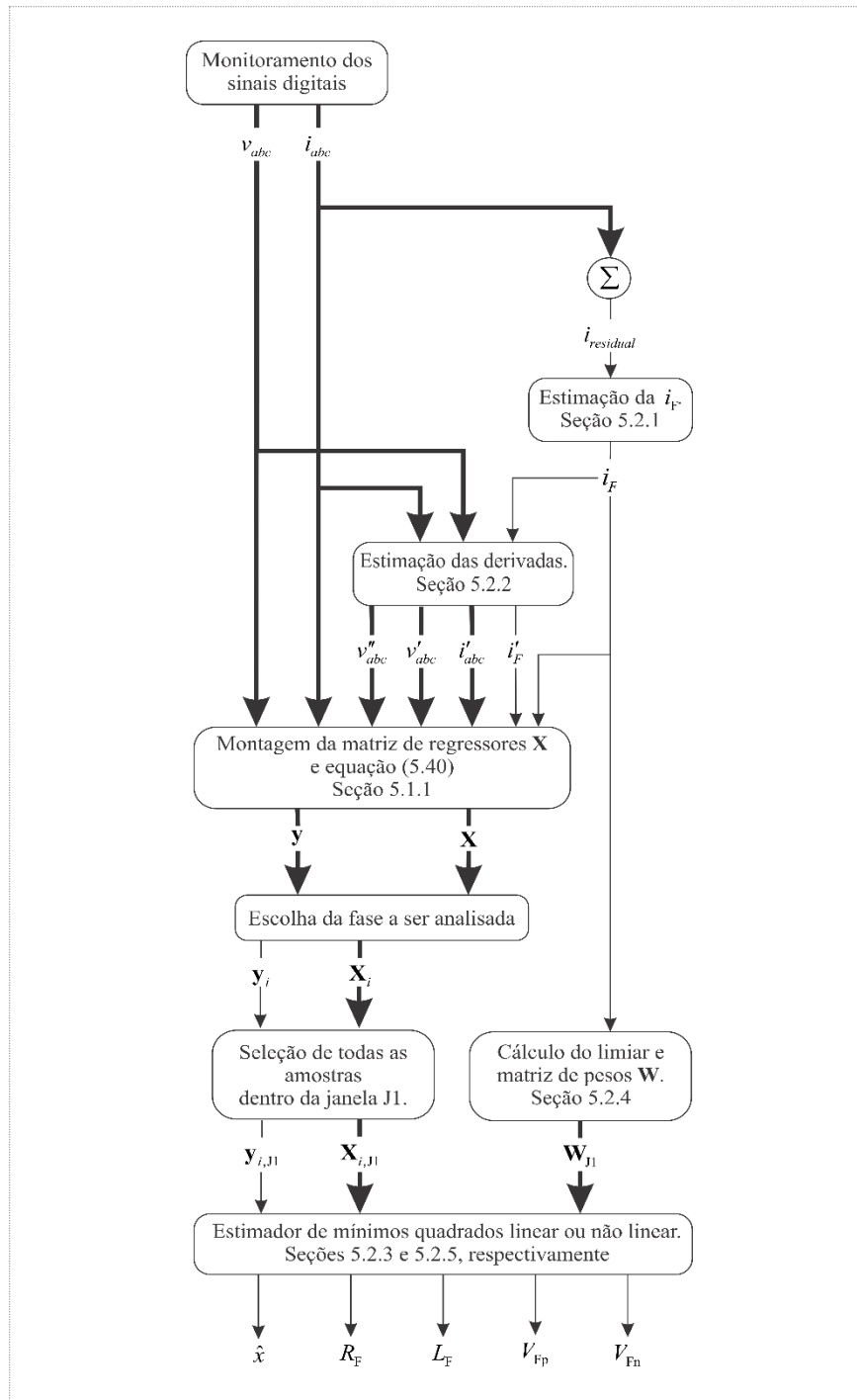


Figura 5.7 - Fluxograma completo para a implementação do AMQL ou AMQNL.
Fonte: O autor (2016).

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentada uma nova técnica para LDFAI em linhas de distribuição fundamentada na estimação de parâmetros do modelo de FAI e da distância da falta mediante mínimos quadrados. As equações foram desenvolvidas segundo as leis de Kirchhoff aplicadas no domínio do tempo e considerando o modelo numérico de FAI proposto por

Emanuel et al. (1990). As equações foram desenvolvidas primeiramente para um sistema monofásico, apresentando logo a sua extensão para sistemas trifásicos, a qual concluiu com a equação (5.40). Como a literatura não registra FAI diferentes às monofásicas, sendo ainda estas as mais prováveis, a técnica proposta considera somente este tipo de faltas.

Com a solução da equação (5.40) são estimados os parâmetros da FAI (R_F , L_F , V_{Fp} e V_{Fn}) em conjunto com a distância desde o terminal de monitoramento até o local da falta. Entretanto, antes de poder resolver equação (5.40) é necessário estimar a corrente de falta e algumas derivadas das tensões e correntes. A corrente de falta foi estimada mediante a subtração do sinal de corrente residual por amostras passadas, como explicado na Seção 5.2.1. As derivadas foram estimadas mediante o EMQ, como foi explicado na Seção 5.2.2. Para a resolução da relação (5.40) foi adotado um método de janela móvel, que fornece uma solução para cada instante de tempo correspondentes aos sinais utilizados. Ainda, a solução foi otimizada mediante a escolha de amostras que ultrapassam um limiar adaptativo em função da corrente de falta estimada, como exposto na Seção 5.2.4.

A equação (5.40) pode ser resolvida com ou sem consideração da capacitância da linha de distribuição. No primeiro caso, utiliza-se o estimador de mínimos quadrados lineares explicado na Seção 5.2.3. Este método de resolução unido às considerações do parágrafo anterior conformam o AMQL. Quando a capacitância da linha é mantida, é necessário utilizar o estimador de mínimos quadrados não linear apresentado na Seção 5.2.5, este método de resolução unido às considerações do parágrafo anterior conformam o AMQNL.

Finalmente, na Seção 5.3 foi apresentado um fluxograma que explica o procedimento completo para LDFAI e estimação dos parâmetros da FAI que foi proposto neste Capítulo.

6 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

Para validar a abordagem proposta neste trabalho foram utilizados modelos numéricos, implementados e simulados no domínio do tempo mediante o *Alternative Transient Program* (ATP). Neste Capítulo serão descritos os procedimentos para modelar a FAI e o sistema de distribuição da IEEE de 13 barras, adotado para realizar os estudos de caso. As avaliações da técnica de LDFAI descrita no Capítulo 5 foram realizadas utilizando o Matlab (MATHWORKS, 2015). O ATP e o Matlab foram utilizados para simular e analisar os resultados de forma automática, mediante um programa desenvolvido para este fim e cuja descrição sucinta se encontra no Apêndice F: Nas subseções seguintes serão apresentados e descritos os estudos de casos realizados e, no Capítulo 7, serão apresentados os respectivos resultados e análises.

6.1 DESCRIÇÃO DA MODELAGEM DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

Como se mostra na Figura 6.1, a resistência de falta (R_F) e indutância de falta (L_F) formam uma impedância de falta denominada como Z_F , em que β é o argumento da mesma considerando uma frequência de 60 Hz, equivalente a $\omega_0 = 2\pi 60$. Neste contexto, a reatância constituída por $j\omega_0 L_F$ será denominada como XL_F . As tensões V_{Fp} e V_{Fn} , que formam parte do modelo de FAI, são denominadas como tensões de arco positiva e negativa, respectivamente. Estas tensões definem os limiares de tensão para os quais o modelo da FAI começa a conduzir a corrente de falta i_F respectivamente no sentido positivo (da linha para a terra) ou negativo (da terra para a linha). A diferença absoluta entre a duas tensões de arco é denominada como ΔV_F .

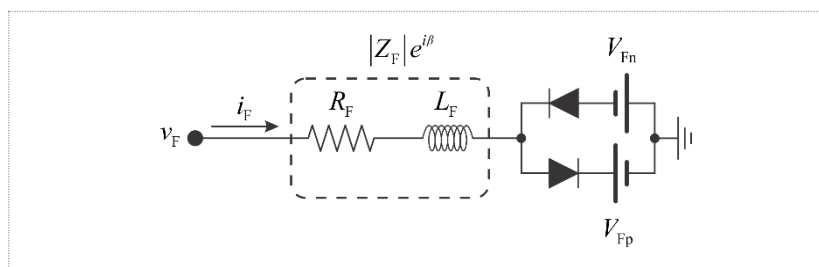


Figura 6.1 - Modelo de FAI em diodos em antiparalelo.
Fonte: (EMANUEL et al., 1990) - modificado.

A forma em que modelo de FAI pode ser implementado no ATPDraw¹⁶ se mostra na Figura 6.2. Nesta figura é possível observar que dois blocos MODELS *type-94*, os quais servem para modelar a L_F . Estes blocos foram programados mediante o método de integração numérica

¹⁶ O ATPDraw é um pré-processador gráfico do ATP desenvolvido para o sistema operacional MS-Windows (HØIDALEN, 2012).

de segunda ordem de Gear (WATSON; ARRILLAGA, 2003), artifício empregado para evitar as oscilações numéricas¹⁷ na tensão do indutor quando a corrente de falta se anula mediante a ação dos diodos antiparalelos. O código escrito para programar os blocos que representam a L_F é apresentado no Apêndice D:.

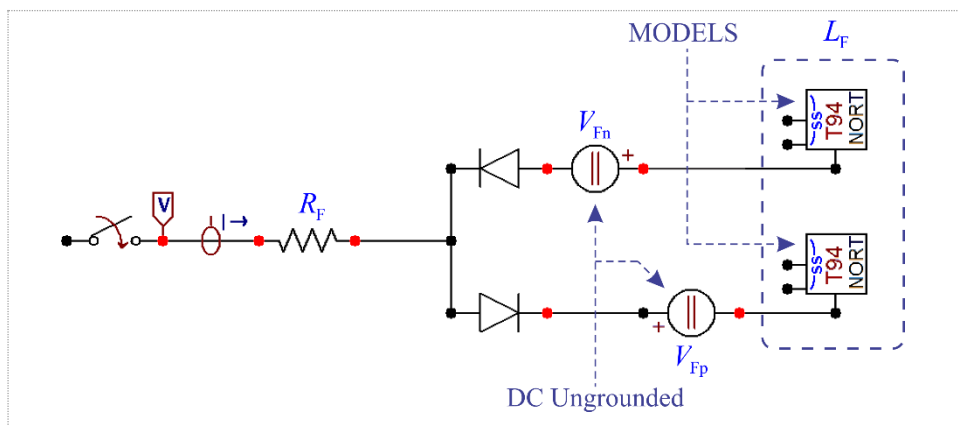


Figura 6.2 - Implementação do modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990) mediante o ATPDraw.

Fonte: O autor (2016).

6.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA SIMULADO

O sistema escolhido para realizar os estudos de caso é o alimentador de 13 barras definido pela IEEE (KERSTING, 2001). Este SDEE é vastamente difundido na comunidade científica e é utilizado para realização de testes numéricos de natureza diversa e para simplificar a comparação entre resultados de diversos pesquisadores. A Figura 6.3 apresenta um diagrama esquemático do referido sistema de potência, indicando com letras a sequência, a quantidade, e sequência das fases que interconectam os diferentes nós. A tensão nominal deste sistema, de 4,16 kV, é conseguida a partir de um nível de 115 kV mediante um transformador de 5 MVA conectado à barra número 650 (subestação). Na Figura 6.3 é possível distinguir que cada nó é identificado com um número e que cada carga é indicada mediante uma seta ligada ao nó correspondente. O sistema original descrito por Kersting (2001) foi modificado para poder representar um SDEE típico do Brasil. Como pode ser percebido, o regulador de tensão na subestação que se encontra presente no sistema teste original foi substituído por um transformador. Ainda, as linhas foram substituídas por configurações aéreas sem neutro, as cargas trifásicas foram modeladas como conexões em triângulo e a totalidade de cargas foram

¹⁷ As oscilações numéricas são inerentes do método de integração trapezoidal, padrão do ATP, e são produzidas quando a corrente que passa por um indutor ou a tensão aplicada a um capacitor, se anulam de forma repentina (MARTI; LIN, 1989).

consideradas como impedâncias constantes. No Apêndice E: são apresentados em detalhes os parâmetros que foram utilizados na modelagem numérica do sistema da Figura 6.3, sendo possível identificar com precisão as modificações feitas respeito ao modelo original apresentado em (KERSTING, 2001).

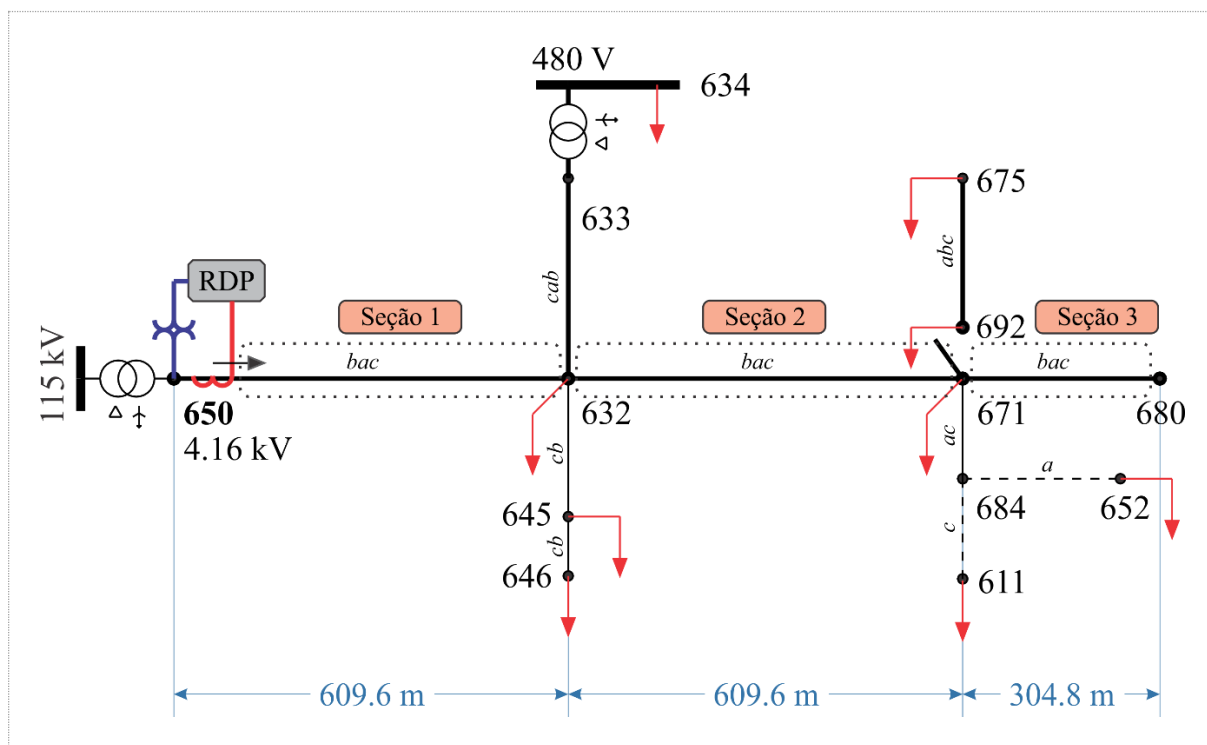


Figura 6.3 - Diagrama do sistema de potência usado nas simulações: IEEE de 13 barras.
Fonte: O autor (2016).

Segundo a Figura 6.3, o sistema teste possui um ramal principal que parte da subestação na barra 650, passando pelos nós 632 e 671, até chegar ao nó 680. Este ramal principal é o alvo do presente estudo e todas as FAI foram simuladas nestas três seções denominadas como seção 1, seção 2 e seção 3, as quais somam um comprimento total de 1524 metros. O símbolo do Registrador Digital de Perturbações (RDP) indica que foram utilizados os sinais de tensão e corrente provenientes da barra 650 e todas as estimativas da distância à falta foram referenciadas a este terminal. Finalmente, a Tabela 6-1 apresenta as distâncias em que as FAI foram simuladas para a realização dos estudos de caso.

Tabela 6-1 - Distâncias a partir da barra 650 em que as faltas foram simuladas.

Seção	Distâncias [m]										
1	4,8	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
2	669,6	729,6	789,6	849,6	909,6	969,6	1029,6	1089,6	1149,6	1209,6	
3	1279,2	1339,2	1399,2	1459,2	1519,2						

6.3 DESCRIÇÕES DOS ESTUDOS DE CASO

Com o objetivo de avaliar o desempenho da abordagem proposta para LDFAI, os estudos de casos serão divididos em quatro grupos: (a) influência da consideração da capacitância no algoritmo, (b) análise de sensibilidade, (c) análise da precisão global do algoritmo e (d) análise qualitativa do algoritmo como potencial detector de FAI. A quantidade numérica adotada para avaliar o desempenho da abordagem proposta é o erro relativo percentual. O valor deste erro em relação à distância estimada da falta é calculado como:

$$\text{Erro} = \frac{\hat{x} - x}{l} 100\%, \quad (6.1)$$

onde:

- \hat{x} : distância estimada da falta;
- x : distância real da falta;
- l : comprimento total da linha (somatório do comprimento das seções 1, 2 e 3).

O erro relativo percentual relacionado aos parâmetros estimados da falta é calculado como:

$$\text{Erro} = \frac{\hat{\theta} - \theta}{\theta} 100\%, \quad (6.2)$$

onde:

- $\hat{\theta}$: parâmetro estimado;
- θ : parâmetro real.

É possível ver que um erro negativo significa a subestimação do parâmetro enquanto que um erro positivo significa a superestimação do parâmetro.

Além do cálculo do erro cometido ao estimar a distância da falta e os parâmetros da FAI, foi avaliado o erro cometido ao estimar a corrente de falta. Como a corrente de falta consiste em um sinal, o método considerado para avaliar a estimação foi o cálculo da norma quadrática do resíduo da corrente de falta, calculada segundo:

$$\left\| \xi_{i_F} \right\|^2 = \left[\hat{i}_F - i_F \right]^T \left[\hat{i}_F - i_F \right], \quad (6.3)$$

Todos os estudos de caso consistiram em simulações de FAI do tipo fase-terra, inseridas nos pontos apresentados na Tabela 6-1. Os grupos que compõem os estudos de caso são descritos a seguir.

6.3.1 Influência da consideração da capacitância no algoritmo

Como foi analisado no Capítulo 5, a equação principal (5.40) apresenta o parâmetro distância da falta elevado ao quadrado. Quando a capacitância da linha de transmissão é desconsiderada, a equação (5.40) resulta em uma equação linear e o AMQL pode ser utilizado. Quando a capacitância é levada em conta, a equação (5.40) deve ser resolvida com o AMQNL. Este último algoritmo segue um processo iterativo, geralmente menos eficiente e de implementação mais laboriosa em comparação ao AMQL. Neste contexto, é importante comparar os resultados obtidos por ambos os algoritmos, se ambos apresentam resultados similares para os casos de interesse, não existe razão para utilizar o AMQNL, já que o AMQL pode resolver o problema de forma mais eficiente. Esta comparação é o objetivo do estudo de caso que avalia a influência da consideração da capacitância.

6.3.2 Análise de sensibilidade

A avaliação da sensibilidade consistiu em realizar variações dos parâmetros que, direta ou indiretamente, possam ter influência nas equações de LDFAI apresentadas no Capítulo 5. Deste modo, serão apresentados os resultados das seguintes variações de parâmetros:

6.3.2.1 Variações dos parâmetros da FAI

Para avaliar quais parâmetros da FAI afetam em maior medida o desempenho da técnica proposta em relação à estimativa da distância da falta e a estimativa dos parâmetros da FAI, os resultados referentes às seguintes variações serão apresentados como:

- a) variação do módulo da Z_F mantendo o ângulo β fixo;
- b) variação do ângulo β mantendo o módulo da Z_F ;
- c) variação da diferença absoluta das tensões de arco positiva e negativa, ΔV_F .

6.3.2.2 Variação do ângulo de incidência da falta

Para saber se existe uma variação considerável na estimativa da distância e parâmetros da FAI quando esta incide em diferentes instantes de tempo (associados a ângulos de incidência, correspondentes a distintos valores da onda de tensão da fase em falta no ponto em que a falta se encontra), foram considerados ângulos de incidência de: 0° , 90° e 180° em relação à onda de tensão da fase em falta, considerando-se uma função cosseno.

6.3.2.3 Variação do carregamento do sistema

Para avaliar a influência das variações de carga no SDEE, será apresentada a comparação entre um cenário de carga máxima e outro de carga mínima.

6.3.3 Análise da precisão global do algoritmo

Neste estudo serão apresentados os resultados de 900 simulações realizadas com FAI aleatórias com o objetivo de conhecer a tendência geral do desempenho da técnica proposta para estimar a distância e os parâmetros da FAI.

6.3.4 Avaliação qualitativa da técnica proposta como potencial do método para detecção e classificação de FAI

Como foi explicado no Capítulo 5, a técnica proposta para resolver a equação (5.40) foi implementada em uma janela móvel que percorre os sinais de tensão e corrente. Isto significa que quando uma amostra nova entra na janela, a amostra mais antiga sai da mesma. Este efeito permite avaliar a evolução do resultado em função do tempo, dando lugar à possibilidade de utilizar a técnica proposta para detectar e classificar FAI de outros eventos. Embora o foco da presente tese não é a detecção, tal possibilidade será explorada de forma qualitativa mediante os seguintes estudos de caso:

- a) comparação entre a energização de um transformador e a incidência de uma FAI;
- b) comparação entre a energização de um capacitor e a incidência de uma FAI;
- c) comparação entre a energização de uma linha com carga e a incidência de uma FAI;
- d) localização da seção em falta mediante monitoração distribuída.

6.4 PARÂMETROS DO ALGORITMO UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE CASO

A seguir são expostos os parâmetros utilizados na execução do AMQL e AMQNL nos estudos de caso:

6.4.1 Estimação da corrente de falta

Segundo o exposto na Seção 5.2.1, a estimação da corrente de falta é realizada mediante a diferença entre a amostra atual e uma amostra passada do sinal de corrente residual, separada por um número inteiro de ciclos. Nos estudos de caso foi utilizado um atraso de três ciclos para realizar a diferença que produz a estimativa da corrente de falta.

6.4.2 Estimação das derivadas

De acordo com o explicado na Seção 5.2.2, para estimar as derivadas o sinal em questão deve ser aproximado mediante um polinômio de grau K dentro de uma janela de tamanho N_d . A seguir são listados os parâmetros utilizados para aproximar os sinais necessários e estimar as suas derivadas:

- derivada primeira da corrente de falta: $K = 6$ e $N_d = 13$;
- derivada primeira das correntes de fase: $K = 3$ e $N_d = 4$;
- derivada primeira das tensões de fase: $K = 3$ e $N_d = 4$;
- derivada segundas das tensões de fase: $K = 3$ e $N_d = 4$;

6.4.3 Tamanho das janelas e limiar para seleção de amostras

Segundo o explicado na Seção 5.2.3, a janela móvel para aplicar o AMQL e AMQNL é denominada como J1 e a janela móvel para selecionar as amostras é denominada como J2. Neste contexto, os tamanhos adotados para J1 e J2 são:

J1: corresponde a 23,33 ms;

J2: corresponde a 33,33 ms;

Para selecionar as amostras dentro de J1 que serão utilizadas para aplicar o AMQL ou o AMQNL, é necessário definir um limiar. Este limiar corresponde ao valor máximo da corrente de falta estimada, que se encontra dentro da janela J2, multiplicado por um fator p . O valor adotado para o fator p foi de 0,15.

6.4.4 Obtenção da estimativa final

A implementação do AMQL ou AMQNL foi realizada mediante janelas móveis, fornecendo estimativas dos parâmetros em função do tempo. Por este motivo, para obter um resultado único foi realizada uma média dos parâmetros dentro de um intervalo definido entre 31,66 e 48,33 ms após a incidência da falta, como se ilustra na Figura 6.4. Em termos de ciclos de frequência fundamental, isto corresponde a 1,9 e 2,9 ciclos depois do instante de incidência da falta. O mesmo intervalo foi utilizado para realizar a média da distância da falta estimada e dos parâmetros estimados da FAI.

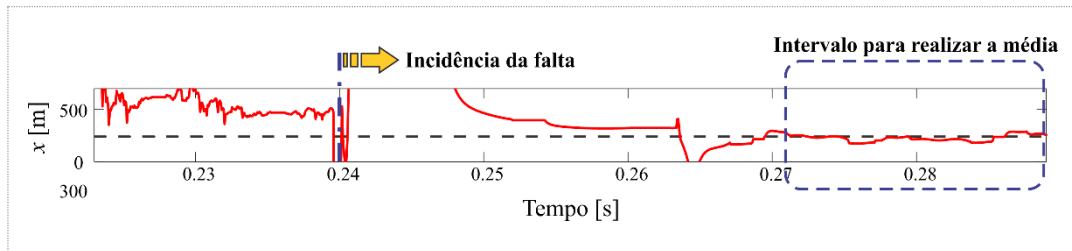


Figura 6.4 – Ilustração do intervalo em que a média das estimativas é realizada. No eixo vertical se mostra a distância da falta estimada e no eixo horizontal o transcurso do instante de aplicação do algoritmo.

Fonte: O autor (2016).

6.4.5 Frequência de amostragem

Neste trabalho foi adotada uma taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo, em relação à frequência nominal de 60 Hz, que resulta em uma frequência de amostragem de 15360 Hz. Esta taxa de amostragem é típica nos Registradores Digitais de Perturbações¹⁸ (PEREZ, 2010) (RDP).

¹⁸ Elemento que inclui oscilógrafos, registradores digitais de faltas, relés de proteção e registradores de transitórios capazes de registrar faltas no SEP (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2006)

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ESTUDOS DE CASO

Neste Capítulo serão apresentados os resultados decorrentes dos estudos de caso descritos no Capítulo 6. Os resultados foram obtidos para simulações de FAI do tipo fase-terra permanentes, segundo o modelo proposto por Emanuel et al. (1990). Além disso, serão mostrados os resultados referentes à consideração da capacitância, análise de sensibilidade, análise global da precisão e uma avaliação qualitativa da técnica proposta como potencial método para detecção e classificação de FAI.

7.1 INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA CAPACITÂNCIA

O desenvolvimento teórico apresentado o Capítulo 5 culminou na equação (5.40), cuja resolução possibilita realizar a LDFAI e a estimação dos parâmetros da FAI. Quando a capacitância da linha de transmissão é considerada, a equação (5.40) deve ser resolvida com o AMQNL. Por outro lado, quando a capacitância da linha de transmissão é desconsiderada, é possível aplicar o AMQL para resolver a relação (5.40). Visando comparar estes dois algoritmos, nesta Seção se apresenta o caso de uma FAI cujas características se descrevem na Tabela 7-1. Esta FAI foi aplicada a uma distância de 240 m a partir da barra 650 segundo a Figura 6.3. A fase em falta foi a fase *b*, e a incidência da falta foi em 0,24 s da simulação, instante correspondente a um ângulo de incidência de 0° segundo explicado na Seção 6.3.2.2 do presente trabalho. Visando melhorar a compreensão do leitor, serão apresentadas figuras que mostram a estimativa da corrente de falta e a estimativa dos parâmetros em função do tempo.

Tabela 7-1 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150 Ω e ângulo de 20 graus

Z_F [Ω]	β [°]	R_F [Ω]	XL_F [Ω]	V_{Fp} [V]	V_{Fn} [V]
125	20	117,46	42,75	1000	1200

A Figura 7.1 mostra a corrente de falta estimada e a corrente de falta real produzida pela FAI em questão. Na figura se indica o instante de incidência mediante uma linha do tipo traço-ponto e a janela móvel J1 como um retângulo tracejado. É possível observar que a corrente de falta estimada é muito similar à corrente de falta real. Entretanto, existem diferenças relevantes localizadas nas proximidades do zero, efeito que existe antes e durante a ocorrência da FAI. Este efeito motivou à seleção das amostras dentro da janela J1 de acordo com o explicado na Seção 5.2.3.

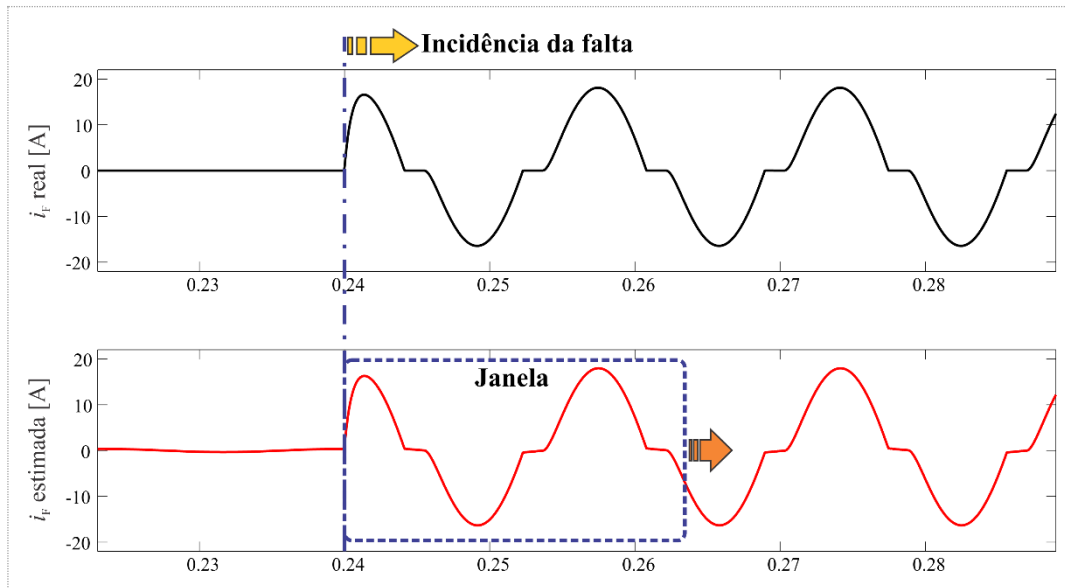


Figura 7.1 - Corrente de falta real (superior) e estimada (inferior). Na figura inferior se ilustra a janela de móvel utilizada para aplicar os algoritmos (J1).

Fonte: O autor (2016).

A Figura 7.2 e a Figura 7.3 mostram o resultado AMQNL e do AMQL, respectivamente, utilizados para resolver a equação (5.40). Da mesma forma que na Figura 7.1, o instante de incidência se indica com uma linha do tipo traço-ponto, os valores reais dos parâmetros se mostram com linhas de traços. A comparação das Figura 7.2 e Figura 7.3 salienta a grande semelhança entre os resultados com e sem consideração da capacitância da linha de transmissão. É possível observar que as diferenças principais se encontram durante o período pré-falta e durante um intervalo de aproximadamente 8 ms após o instante de incidência da falta. Durante o curto período após a incidência da falta, o AMQNL apresentou uma matriz Hessiana singular, pelo que o algoritmo manteve a última solução estável. Já AMQL conseguiu apresentar uma solução imediatamente depois da incidência da falta. Depois do transcurso do período transitório, a solução apresentada pelo AMQNL e AMQL foram praticamente idênticas. Este comportamento foi mantido também para outros tipos de FAI simuladas em distintos pontos do SEP simulado.

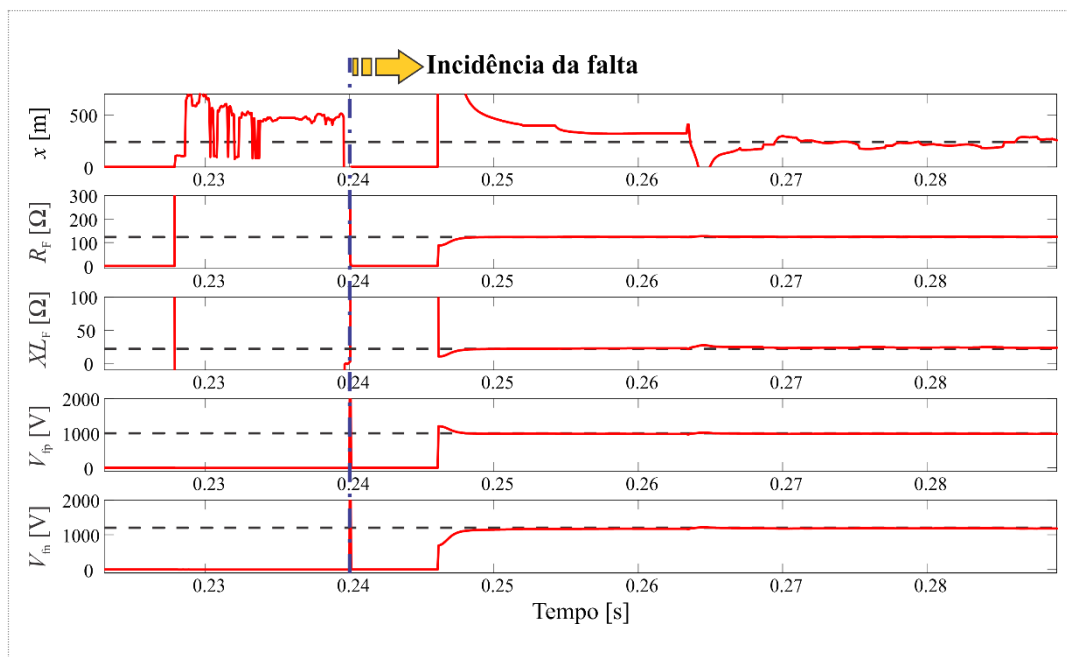


Figura 7.2 - Resultados do AMQNL para considerar a capacitância da linha.
Fonte: O autor (2016).

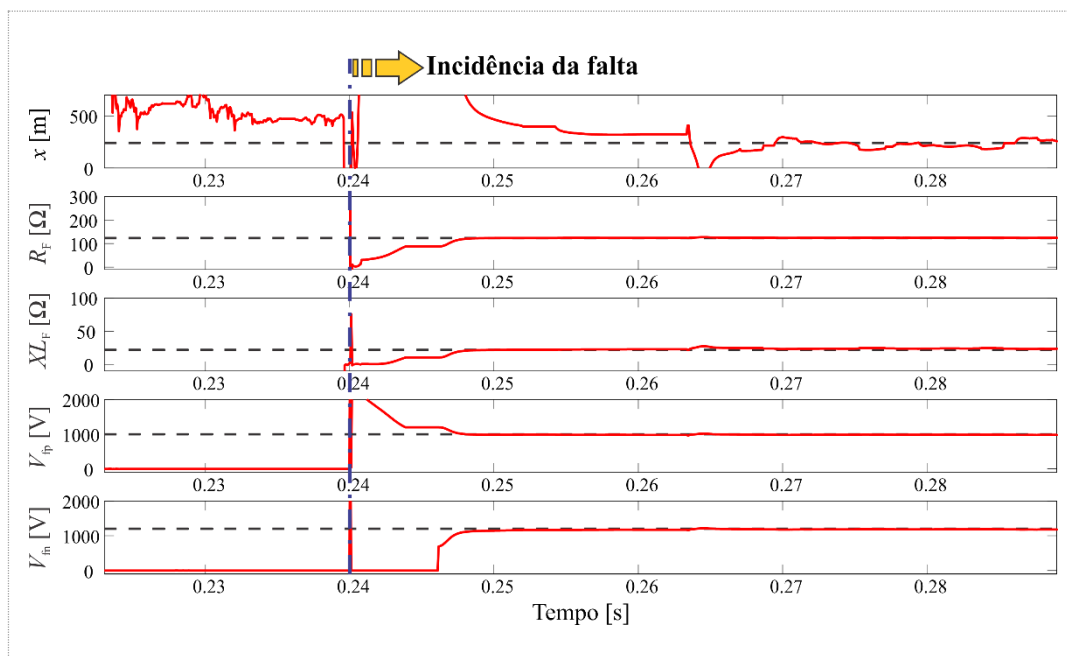


Figura 7.3 - Resultados do AMQL sem considerar a capacitância da linha.
Fonte: O autor (2016).

A análise relacionada à comparação entre as Figura 7.2 e Figura 7.3 mostra que, para o caso estudado, é possível desconsiderar a capacitância da linha sem modificar a precisão e exatidão na solução da equação (5.40). Esta conclusão é válida somente no escopo dos testes apresentados neste trabalho, não podendo ser generalizada para todos os SEP. O AMQL apresenta uma solução direta em cada passo da janela móvel e não precisa de iterações do método de Newton, empregado no AMQNL. Ainda, o AMQL foi capaz de identificar o instante

de incidência da FAI com maior exatidão que o método AMQNL. É importante salientar que o AMQL tem a habilidade de apresentar sempre uma solução numérica graças à utilização do algoritmo SVD. Com base no estudo apresentado nesta Seção, apenas o AMQL será considerado e avaliado nos demais estudos de caso.

7.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A resistência de falta e demais parâmetros dependem das propriedades físicas do meio em que estas são produzidas, transformando às faltas em eventos estocásticos. O modelo de FAI adotado possui quatro parâmetros: a resistência de falta R_F , a indutância de falta L_F , a tensão de arco positiva V_{Fp} e a tensão de arco negativa V_{Fn} . Os parâmetros R_F e L_F formam a impedância de falta Z_F , cujo ângulo para 60 Hz será denominado como β . O módulo da diferença entre as tensões V_{Fp} e V_{Fn} será denominado como ΔV_F . Além dos parâmetros próprios da FAI, existem outros que também variam de forma aleatória, sendo o ângulo de incidência da falta e a variação do carregamento do SEP, os quais serão analisados neste trabalho. A sensibilidade da técnica proposta perante as variações aqui descritas será analisada por meio dos resultados que serão apresentados nesta Seção.

7.2.1 Efeito da variação dos parâmetros da FAI

7.2.1.1 Influência da variação da impedância de falta

Para analisar a influência da impedância de falta, o módulo desta foi aumentando enquanto o ângulo β permanecia constante. O procedimento foi repetido para três ângulos e cinco módulos diferentes de acordo com a Tabela 7-2. Cada uma das FAI foram simuladas em cada uma das distâncias apresentadas na Tabela 6-1, abrangendo todas as seções do sistema teste. Da Figura 7.4 à Figura 7.10 se mostram os erros percentuais na estimativa da distância da falta e cada parâmetro da FAI mediante o AMQL. Os respectivos erros foram calculados segundo as equações (6.1), (6.2) e (6.3).

Tabela 7-2 - Variações de ângulo e magnitude da impedância de falta. Tensões de arco mantidas fixas em:
 $V_{Fp} = 1000 \text{ V}$ e $V_{Fn} = 1200 \text{ V}$.

$Z_F [\Omega]$	$\beta = 10^\circ$		$\beta = 20^\circ$		$\beta = 30^\circ$	
	$R_F [\Omega]$	$XL_F [\Omega]$	$R_F [\Omega]$	$XL_F [\Omega]$	$R_F [\Omega]$	$XL_F [\Omega]$
100	98,4808	17,3648	93,9693	34,202	86,6025	50
125	123,101	21,706	117,4616	42,7525	108,2532	62,5
150	147,7212	26,0472	140,9539	51,303	129,9038	75
175	172,3414	30,3884	164,4462	59,8535	151,5544	87,5
200	196,9616	34,7296	187,9385	68,404	173,2051	100

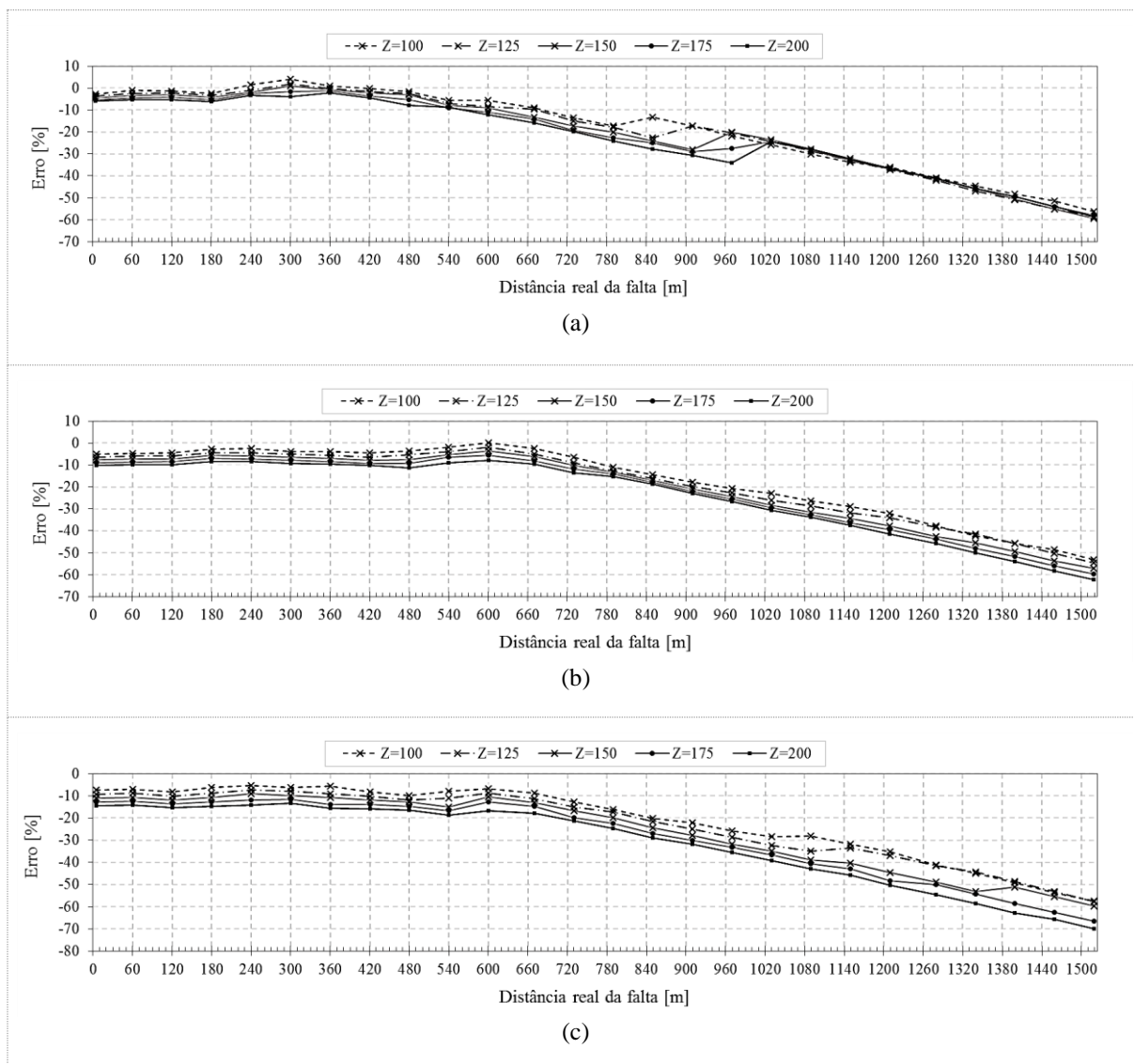


Figura 7.4 - Erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$.

Fonte: O autor (2016).

A Figura 7.4 mostra como variam os erros na estimativa da distância da falta em função da distância real da falta, para Z_F variando de 100 a 200 Ω . Considerando a Figura 6.3, é possível ver que o erro tende a ser constante em função da distância real da FAI quando a mesma está localizada na seção 1. As cargas laterais que se mostram no final da seção 1 da Figura 6.3, justificam o incremento do erro a partir da seção 2 para os ângulos $\beta = 20^\circ$ e 30° . Entretanto, quando $\beta = 10^\circ$ é possível ver que o aumento do erro em proporção à distância da falta acontece um pouco antes do final da seção 1. O aumento da Z_F tende a aumentar o erro da distância estimada em forma proporcional, quanto maior o ângulo β , maior é a influência do aumento do erro devido ao acréscimo do módulo da Z_F .

É possível observar que na maioria dos casos os erros são negativos, indicando uma tendência a subestimar a distância da falta. Para entender melhor o comportamento do

algoritmo, a Figura 7.5 mostra a distância estimada em função da distância real da falta. Em todos os casos é possível notar que a distância de falta estimada tende a permanecer com o mesmo valor quando a falta se encontra a jusante da seção 1. Quando a falta se encontra próxima ao terminal de monitoração, a distância de falta estimada é negativa.

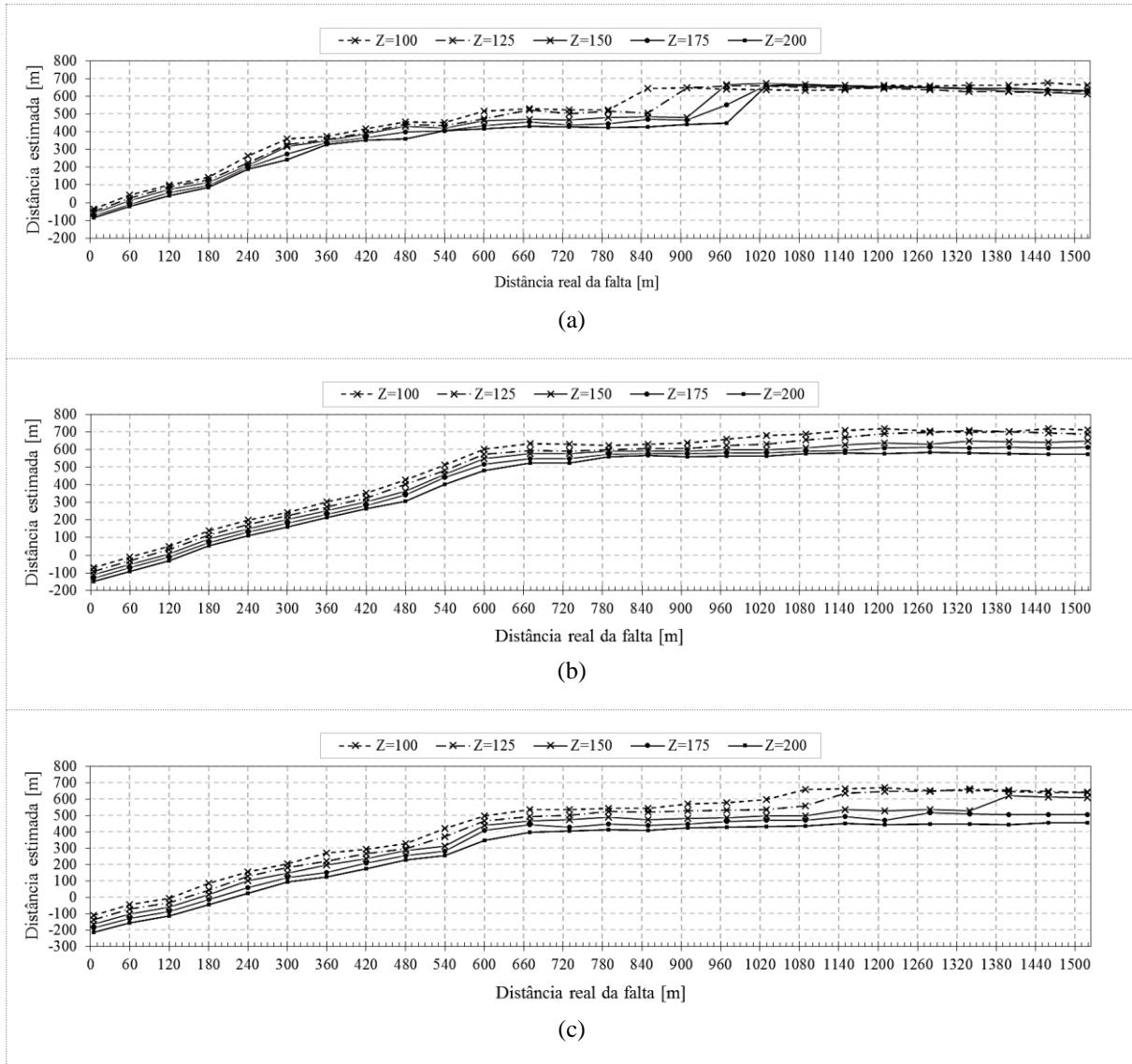


Figura 7.5 - Distância estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$.
 Fonte: O autor (2016).

Considerando o pior caso, quando $Z_F = 200 \Omega$, a Figura 7.5 mostra que a distância da falta estimada começa a ser positiva quando a distância de falta real está entre os seguintes valores:

- 60 e 120 m para $\beta = 10^\circ$;
- 120 e 180 m para $\beta = 20^\circ$ e;
- 180 e 240 m para $\beta = 30^\circ$.

Neste caso geral, a distância de falta máxima estimada nunca supera o comprimento da seção 1, exceto no caso de $\beta = 10^\circ$, onde é superada por 50 m aproximadamente. Estas variações em função de β são devidas ao aumento geral do erro com o acréscimo deste ângulo.

Na Figura 7.6 são apresentados os erros na estimativa da resistência de falta em função da distância real da falta.

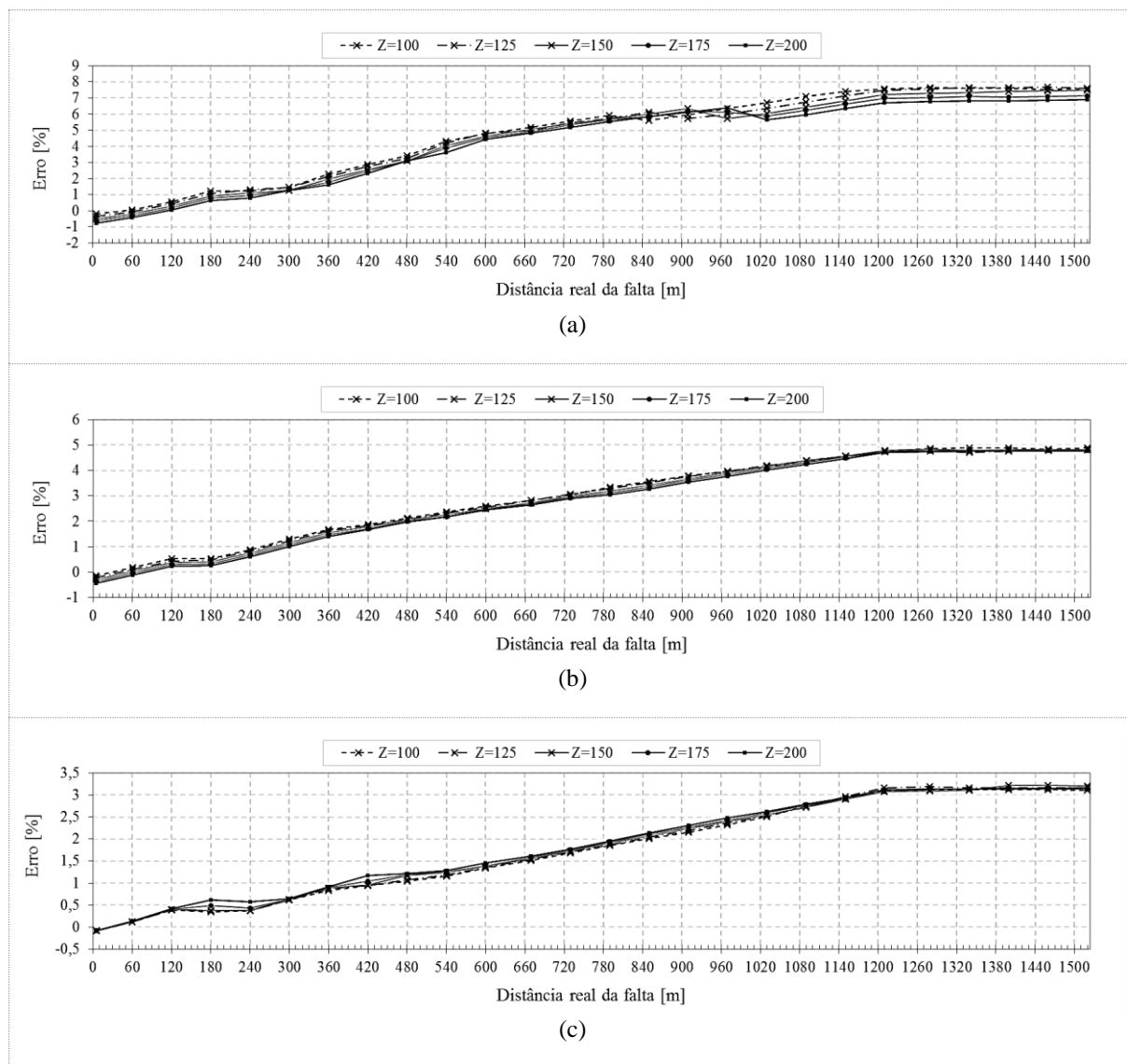


Figura 7.6 - Erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$.
Fonte: O autor (2016).

Primeiramente é possível observar que as curvas de erros para diferentes módulos da Z_F estão quase sobrepostas, o que permite concluir que a variação do módulo não possui uma influência significativa na estimativa da R_F . Nos primeiros metros da linha de distribuição é possível observar uma ligeira subestimação do parâmetro que não supera -1 %. A curva do erro em função da distância mostra um aumento como acréscimo da distância da falta, entretanto, a inclinação desta curva diminui na medida em que o ângulo β aumenta. É possível observar que

a partir da terceira seção do sistema o erro tende a ficar estável entre 7 e 8 % para $\beta = 10^\circ$, próximo de 5 % para $\beta = 20^\circ$ e próximo de 3 % para $\beta = 30^\circ$.

Os resultados indicam que para este estudo de caso a R_F pode ser estimada com uma exatidão e precisão aceitáveis, sem importar em que lugar do sistema está localizada a FAI.

A Figura 7.7 mostra o erro cometido na estimativa da L_F em função da distância real da falta.

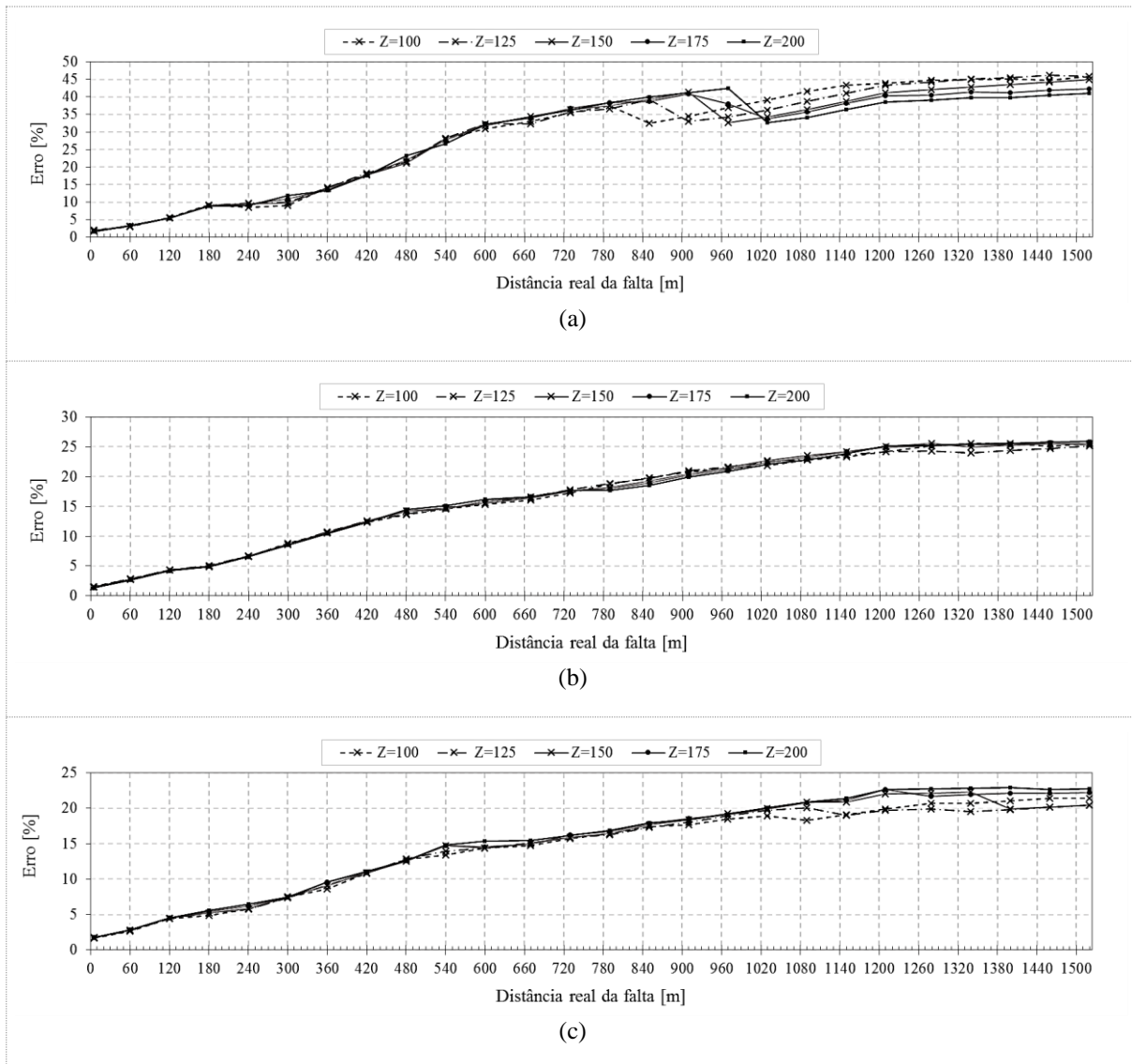


Figura 7.7 - Erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$.

Fonte: O autor (2016).

Esta figura mostra que as curvas de erros para diferentes módulos da Z_F estão quase sobrepostas, o que permite concluir que a variação deste módulo não possui uma influência significativa na estimativa da L_F . Em comparação com a estimativa da R_F , a estimativa da L_F mostra um comportamento similar em função da distância real da falta, porém, os valores absolutos dos erros são em geral maiores e não são advertidas subestimações. A curva do erro em função da

distância mostra um aumento como acréscimo da distância real da falta, entretanto, a inclinação desta curva diminui na medida em que o ângulo β aumenta. É possível observar que a partir da terceira seção do sistema o erro tende a saturar entre 40 e 45 % para $\beta = 10^\circ$, próximo a 25 % para $\beta = 20^\circ$ e próximo a 20 % para $\beta = 30^\circ$.

Os resultados indicam que para este estudo de caso a L_F pode ser estimada com precisão aceitável, sem importar em que lugar do sistema está localizada a FAI.

As Figura 7.8 e Figura 7.9 mostram o erro na estimativa da V_{Fp} e V_{Fn} em função da distância real da falta para as variações da Z_F apresentadas na Tabela 7-2.

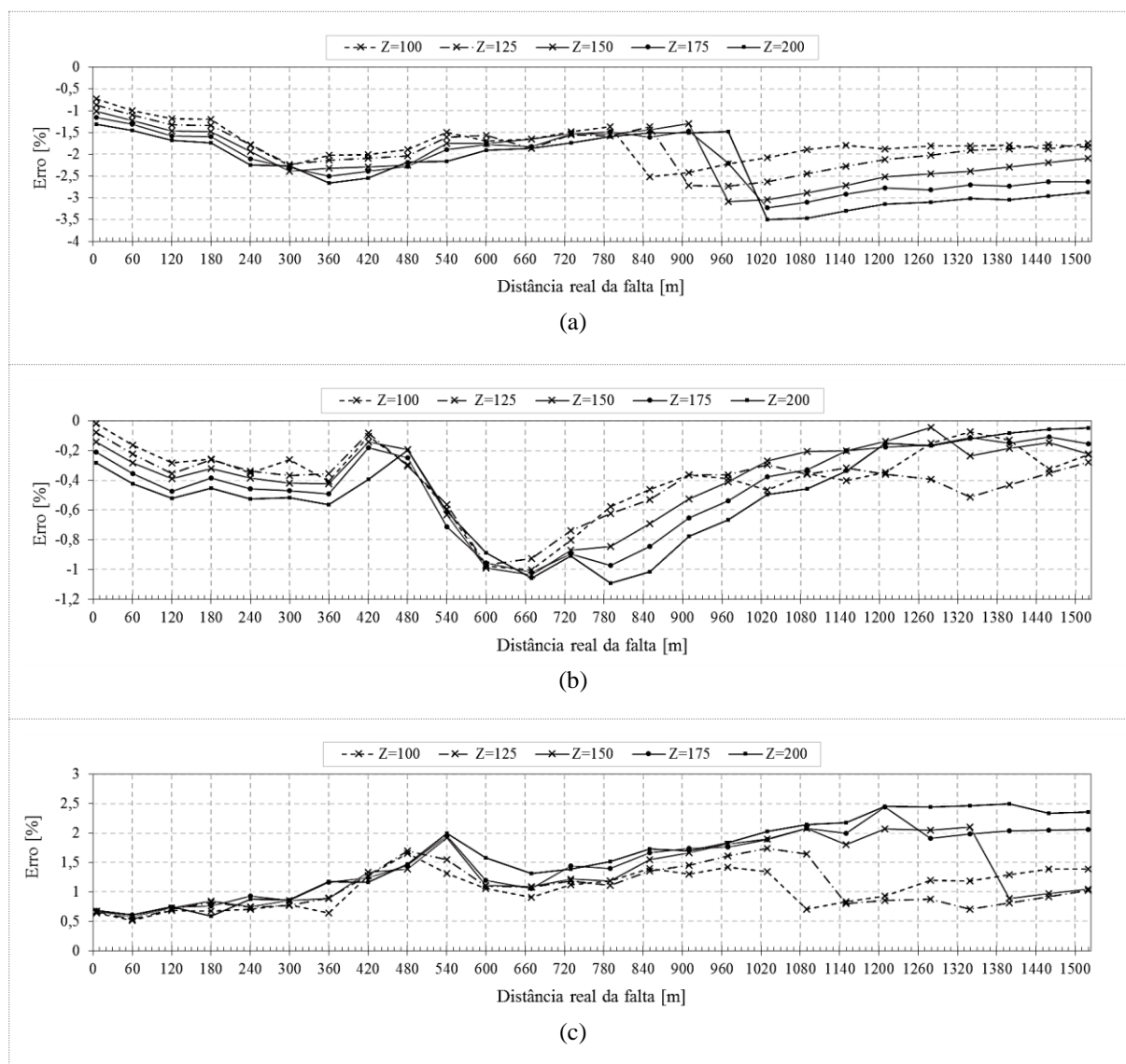


Figura 7.8 - Erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$.

Fonte: O autor (2016).

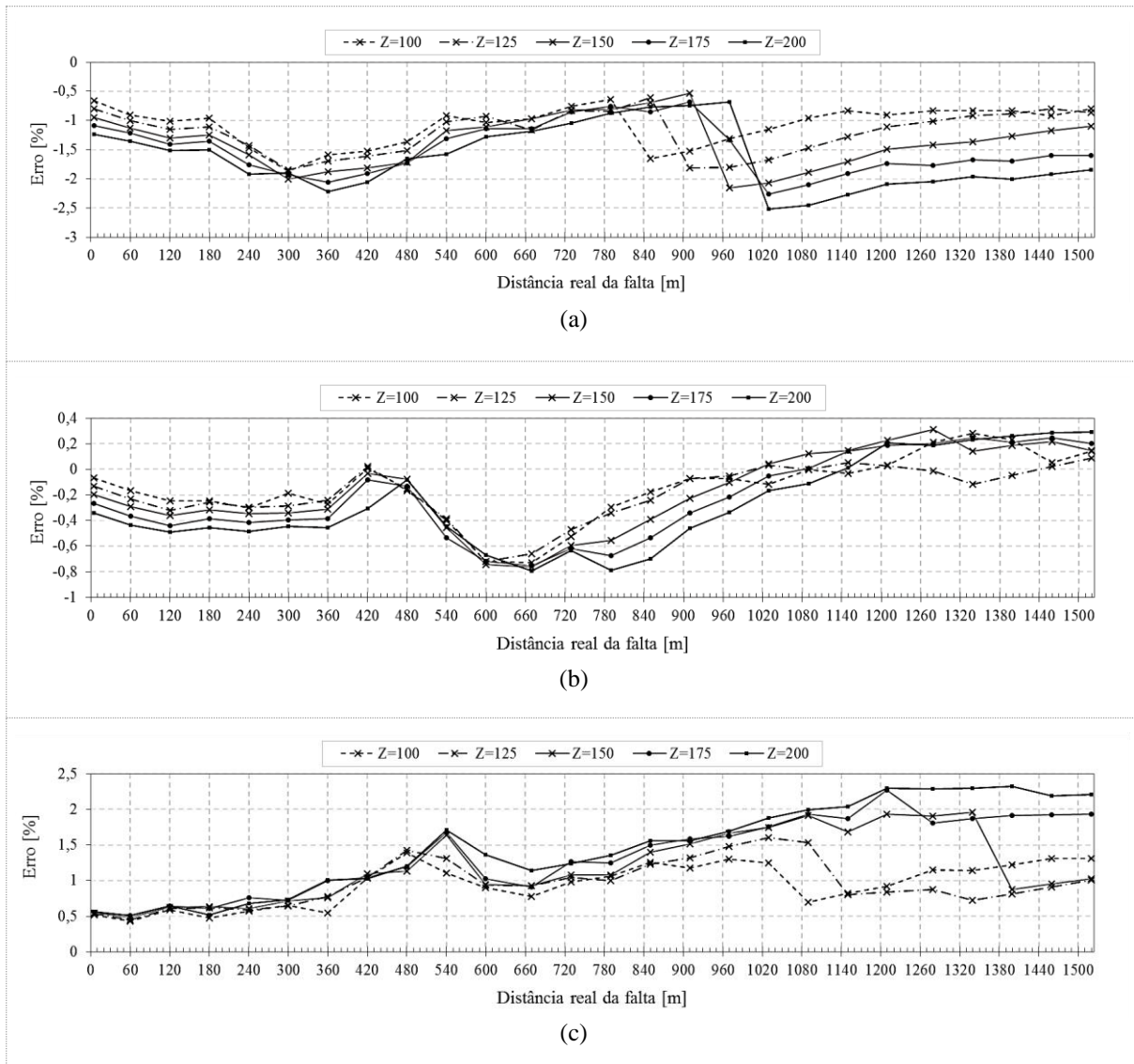


Figura 7.9 - Erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta (na legenda, $Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$.

Fonte: O autor (2016).

As duas figuras apresentam um comportamento muito semelhante, com uma tendência à subestimação dos parâmetros quando β tem o valor de 10° ou 20° e uma tendência à superestimação quando β possui o valor de 30° . O erro tende a permanecer entre uma faixa de valores estáveis em função da distância. Por outro lado, o erro aumenta com o aumento do módulo de Z_F . Para $\beta = 30^\circ$, é possível observar um incremento na dispersão dos resultados com o acréscimo da distância da falta. Os erros na estimativa da V_{Fp} e V_{Fn} são muito menores quando comparados com as estimativas da distância da falta e da L_F , permanecendo na média global de 0% e não superando os 3,5% de erro absoluto.

A respeito dos resultados na estimativa da V_{Fp} e V_{Fn} , é possível concluir que para este estudo de caso os mesmos podem ser estimados com precisão e exatidão aceitáveis, sem importar em que parte do sistema está localizada a FAI.

A Figura 7.10 mostra a norma quadrática do resíduo $\|\xi\|^2$ na estimação da corrente de falta em função da distância real em que a falta se encontra. Esta norma foi calculada com a equação (6.3) no intervalo em que a média da estimativa dos parâmetros foi realizada segundo explicado na Seção 6.4.4. É possível observar que a $\|\xi\|^2$ apresenta tendência de aumentar com a distância da falta. Quando a falta entra na seção 2 do sistema, a taxa de aumento da $\|\xi\|^2$ com a distância diminui e permanece aproximadamente constante quando a falta está na seção 3.

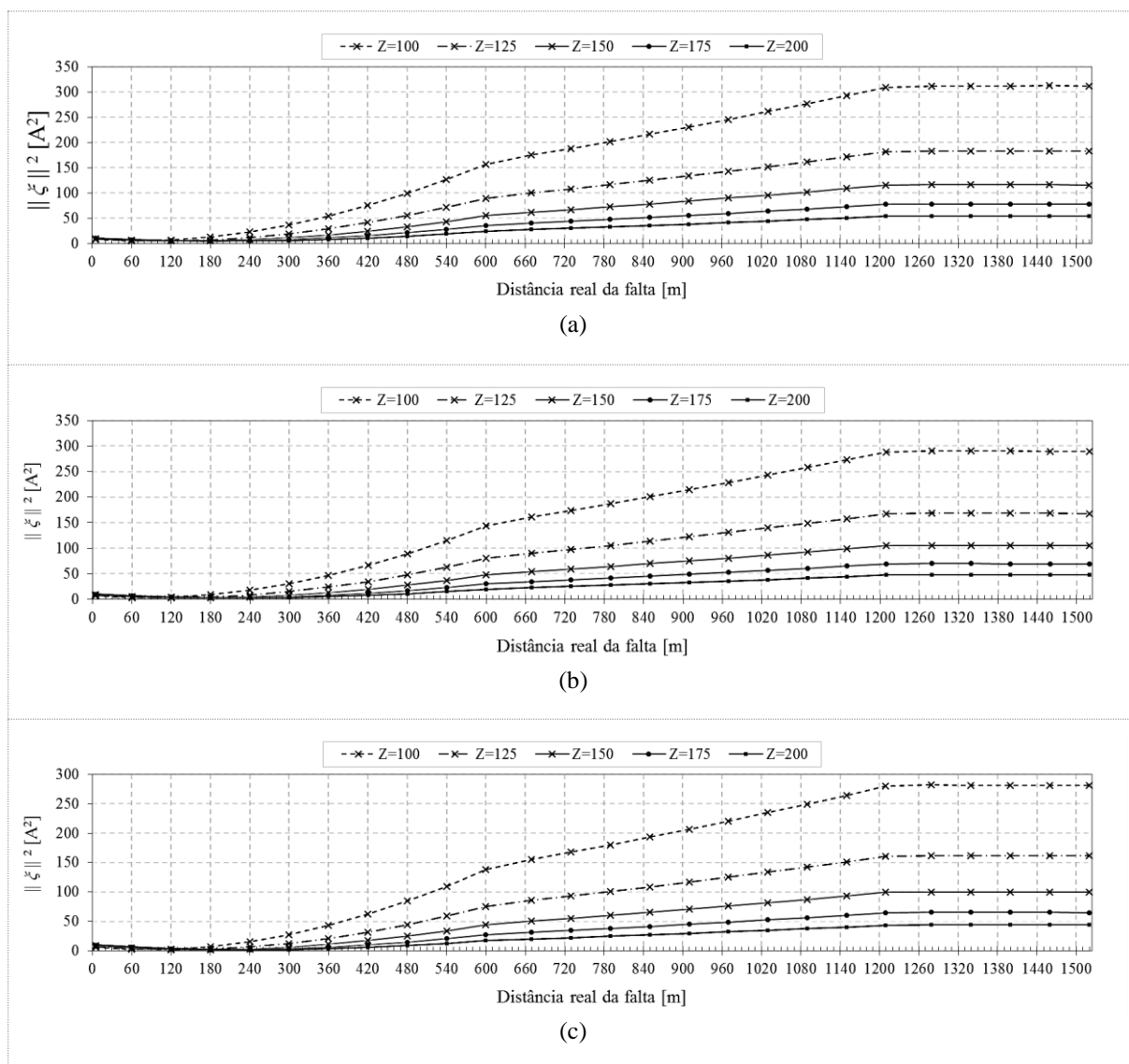


Figura 7.10 – Norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações na impedância de falta ($Z \equiv Z_F$): (a) $\beta = 10^\circ$; (b) $\beta = 20^\circ$; (c) $\beta = 30^\circ$.

Fonte: O autor (2016).

Quando o módulo de Z_F aumenta, a $\|\xi\|^2$ diminui. Este comportamento chama a atenção porque é oposto ao relacionado com a estimativa da distância. Entretanto, isto pode ser explicado pelo fato de a corrente de falta diminuir quando o módulo de Z_F aumenta, fazendo com que a diferença entre a corrente de falta real e estimada também seja menor.

7.2.1.2 Influência da variação das tensões de arco

Para analisar a influência da variação das tensões de arco da FAI, a Z_F foi mantida no valor constante de 150Ω e ângulo β de 20° . Enquanto isto, o valor da ΔV_F foi variado de acordo com o exposto na Tabela 7-3. As FAI foram simuladas abrangendo todas as seções do sistema teste segundo as distâncias apresentadas na Tabela 6-1. Os erros percentuais na estimativa de cada parâmetro, mediante o AMQL, são apresentados da Figura 7.11 à Figura 7.16.

Tabela 7-3 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150Ω e ângulo de 20 graus

R_F [Ω]	X_{L_F} [Ω]	V_{Fp} [V]	V_{Fn} [V]	ΔV_F [V]
140,95	51,30	1050	1150	100
140,95	51,30	1000	1200	200
140,95	51,30	900	1300	400
140,95	51,30	800	1400	600
140,95	51,30	700	1500	800

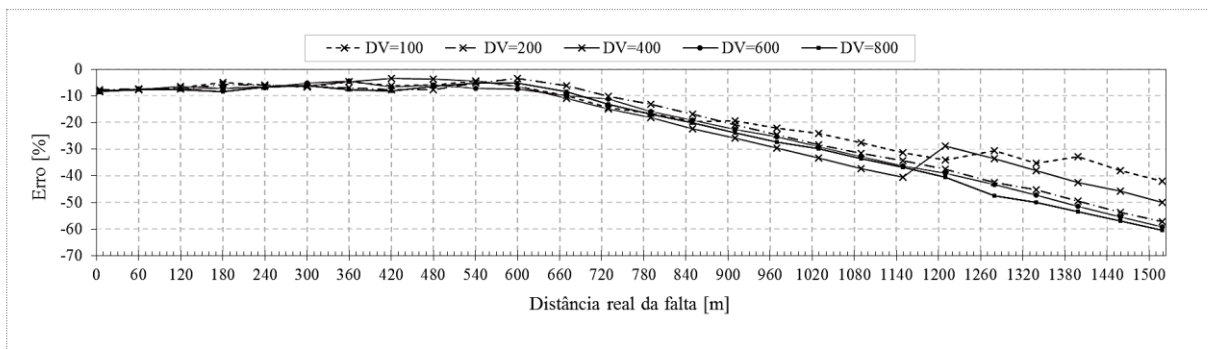


Figura 7.11 - Erro percentual na distância estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).

Fonte: O autor (2016).

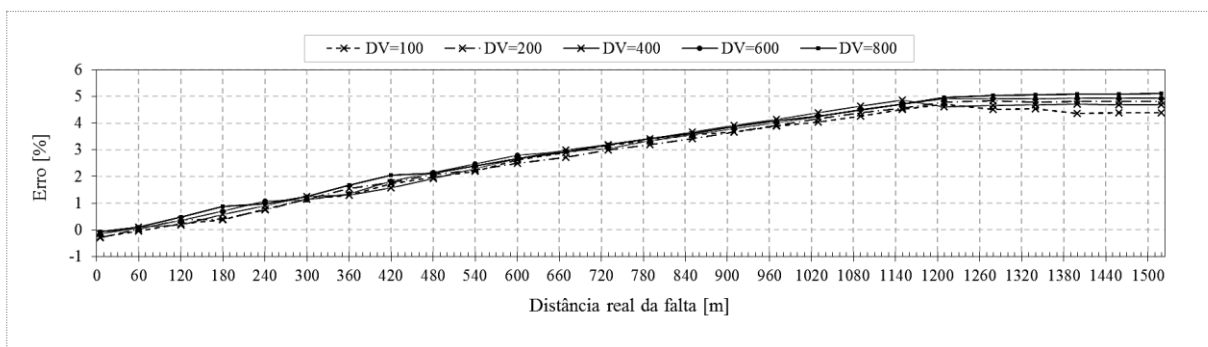


Figura 7.12 - Erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).

Fonte: O autor (2016).

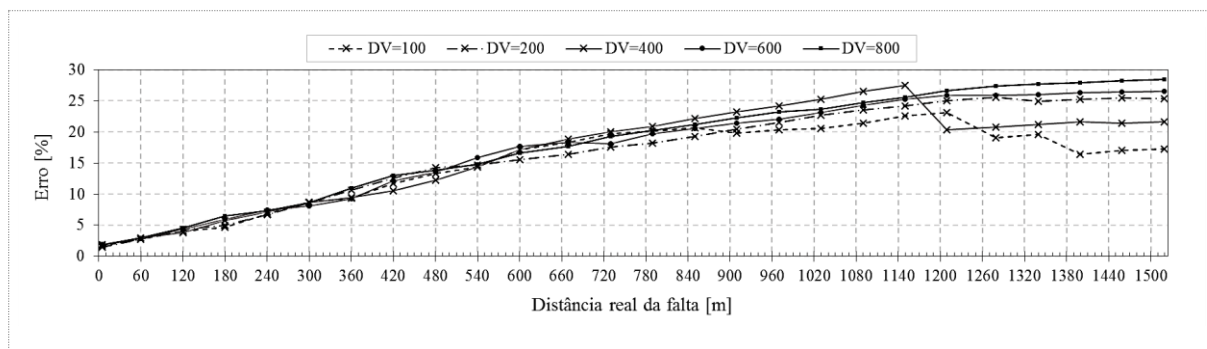


Figura 7.13 - Erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).

Fonte: O autor (2016).

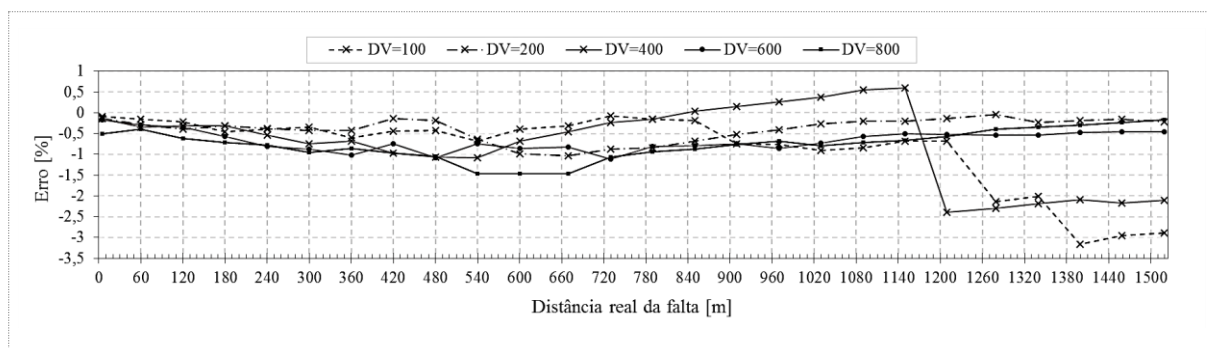


Figura 7.14 - Erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).

Fonte: O autor (2016).

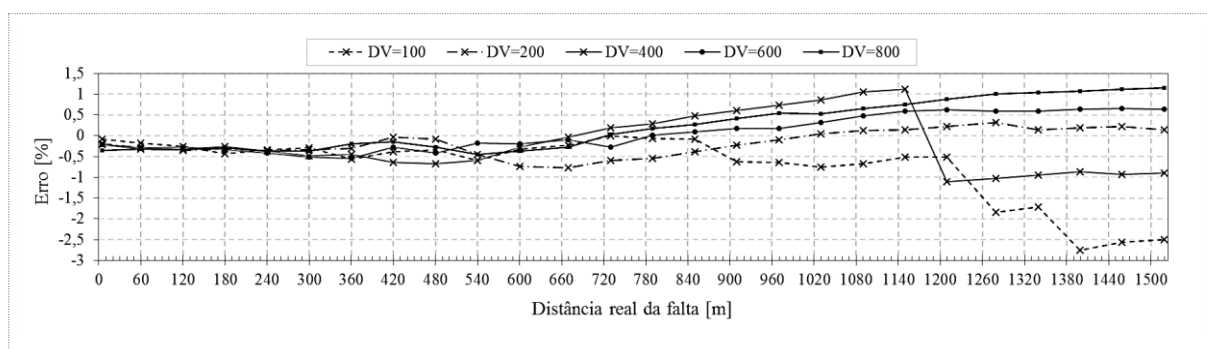


Figura 7.15 - Erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).

Fonte: O autor (2016).

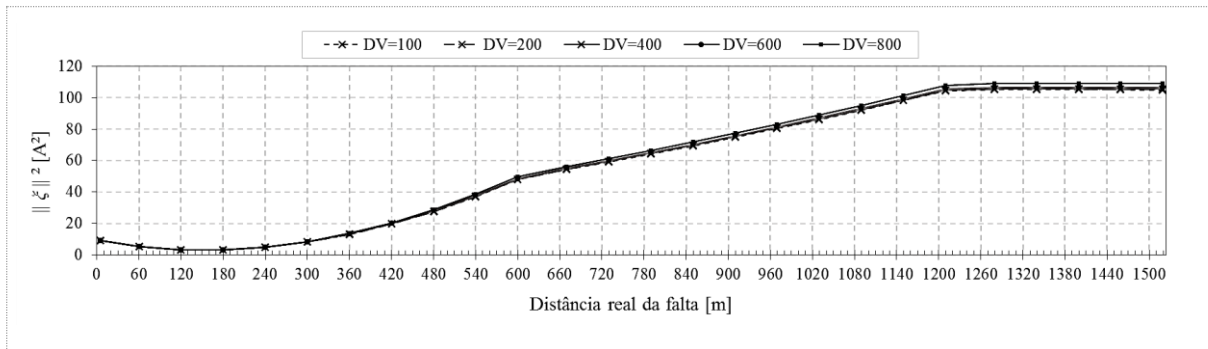


Figura 7.16 - Norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações na diferença de tensão de arco (na legenda, $DV \equiv \Delta V_F$).

Fonte: O autor (2016).

Os resultados apresentados da Figura 7.11 à Figura 7.16 mostram os mesmos comportamentos que foram explicados na subseção anterior. Entretanto, não é possível observar uma influência significativa dos mesmos com a variação da ΔV_F , para FAI dentro das seções 1 e 2. A partir das faltas localizadas na seção 3 do sistema, é possível observar um aumento na dispersão dos erros da estimativa de todos os parâmetros, com uma perceptível tendência a aumentar com o acréscimo da ΔV_F . É possível observar que na seção 3 o $\|\xi\|^2$ também mostra uma tendência mais marcada a subir com o aumento da ΔV_F .

7.2.2 Influência do ângulo de incidência da falta

A influência do ângulo de incidência da falta pode ser analisada por meio dos resultados apresentados nas Figura 7.17 a Figura 7.22. Tais figuras mostram os valores médios dos erros percentuais em função da distância real da falta para as simulações das FAI apresentadas na Tabela 7-5, considerando três instantes de incidência distintos. Cada instante de tempo representa um ângulo de incidência segundo a Tabela 7-4 e as FAI foram geradas de forma aleatória.

Tabela 7-4 - Instantes de incidência das faltas de alta impedância.

Denominação	t1	t2	t3
Ângulo de incidência [°]	0	90	180
Instante de incidência [s]	0,24	0,243	0,248

O ângulo de incidência é referido à tensão da fase em falta, no local da falta, em relação a uma onda cosseno.

Tabela 7-5 - Variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância utilizadas para avaliar a influência do instante de incidência da falta.

Z_F [Ω]	β [°]	R_F [Ω]	XL_F [Ω]	V_{Fp} [V]	V_{Fn} [V]
102,6	12,9	100	23	1000	1264
158,1	18,4	150	50	958	1189
205	12,7	200	45	1196	1405
174,9	18,3	166	55	1110	1100
149,9	24,8	136	63	900	1300

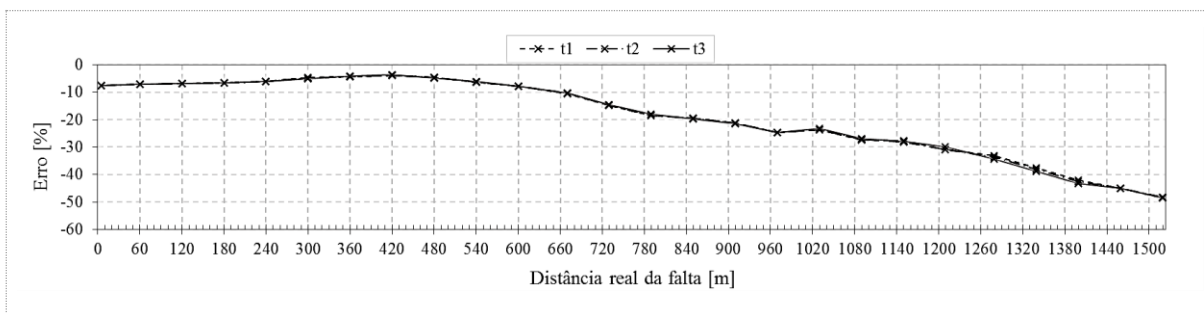


Figura 7.17 - Média do erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.

Fonte: O autor (2016).

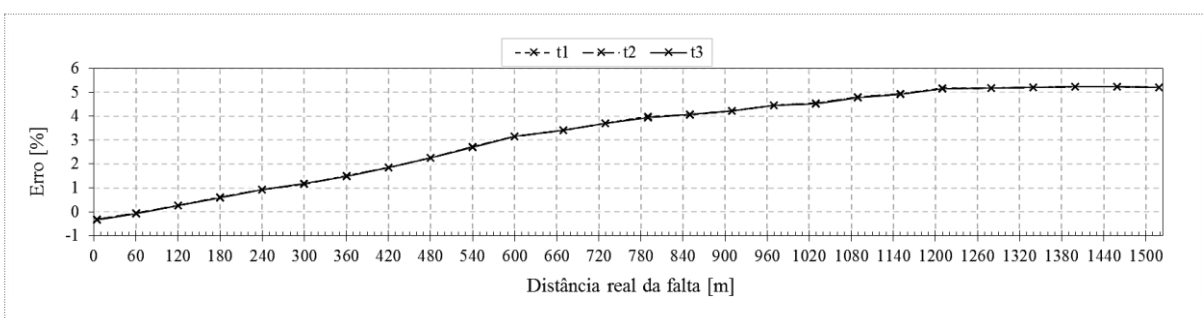


Figura 7.18 - Média do erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.

Fonte: O autor (2016).

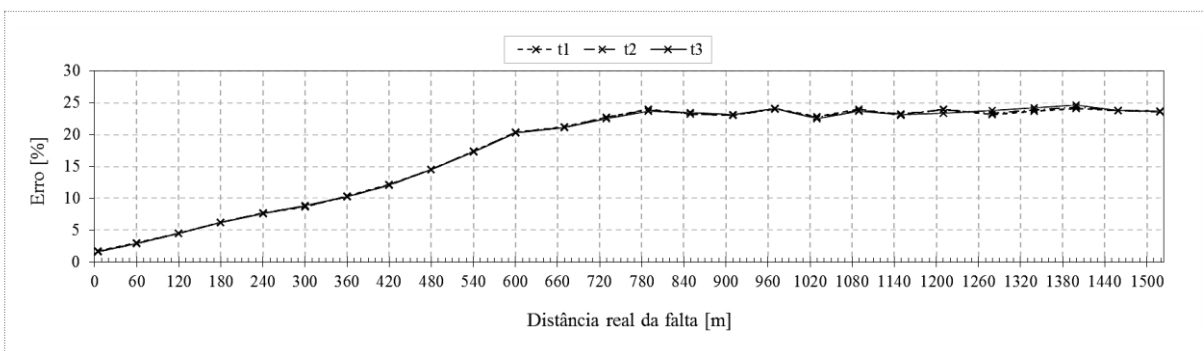


Figura 7.19 - Média do erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.

Fonte: O autor (2016).

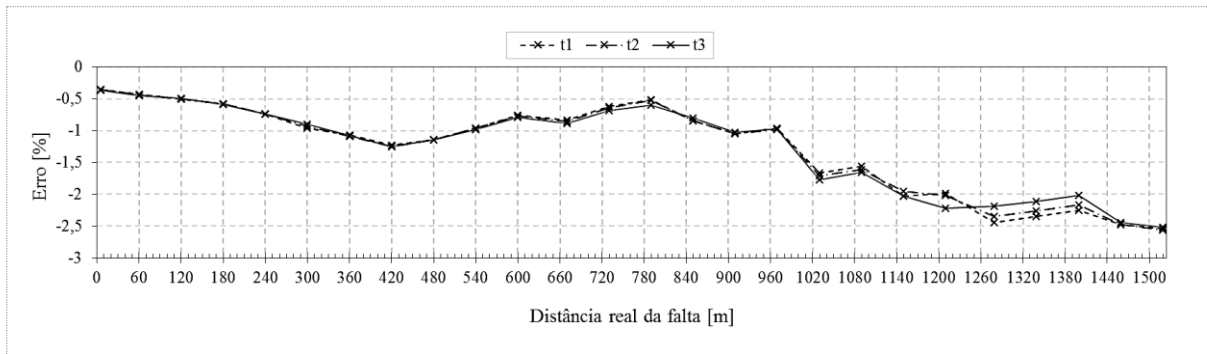


Figura 7.20 - Média do erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.
 Fonte: O autor (2016).

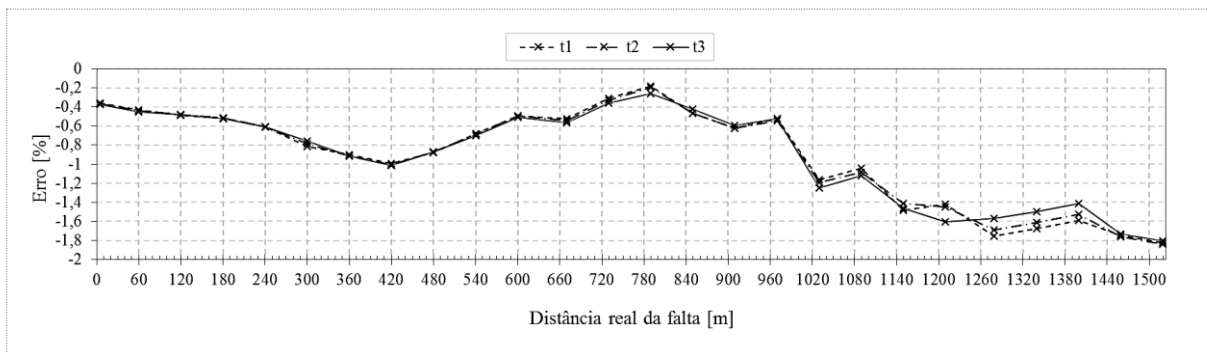


Figura 7.21 - Média do erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.
 Fonte: O autor (2016).

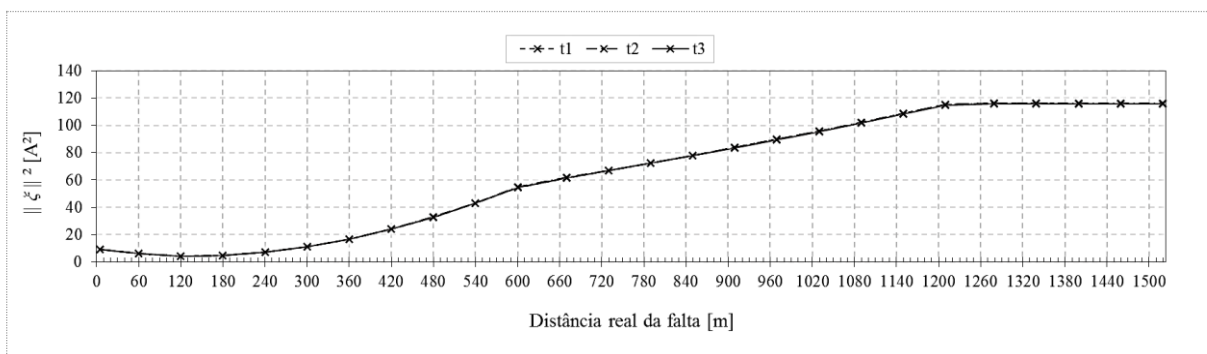


Figura 7.22 - Média da norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações no instante de incidência.
 Fonte: O autor (2016).

A sobreposição dos resultados mostrados nas Figura 7.17 a Figura 7.22 demonstra que o AMQL não é sensível às variações nos ângulos de incidência da FAI.

7.2.3 Influência da variação do carregamento do sistema

Para análise da influência do carregamento são consideradas as FAI apresentadas na Tabela 7-6, geradas de forma aleatória. A média dos resultados obtidos na simulação destas FAI são apresentados nas Figura 7.23 a Figura 7.28, considerando dois tipos de carregamento. O carregamento máximo é o mesmo utilizado em todos os estudos de caso anteriores, o carregamento mínimo corresponde à consideração de apenas metade da potência correspondente a cada carga.

Tabela 7-6 - Variações aleatórias de faltas de alta impedância utilizadas para analisar a influência do carregamento do sistema.

Z_F [Ω]	β [$^\circ$]	R_F [Ω]	XL_F [Ω]	V_{FP} [V]	V_{Fn} [V]
64,2	21	60	23	1000	1264
151,3	7,6	150	20	958	1189
206,1	14	200	50	1196	1405

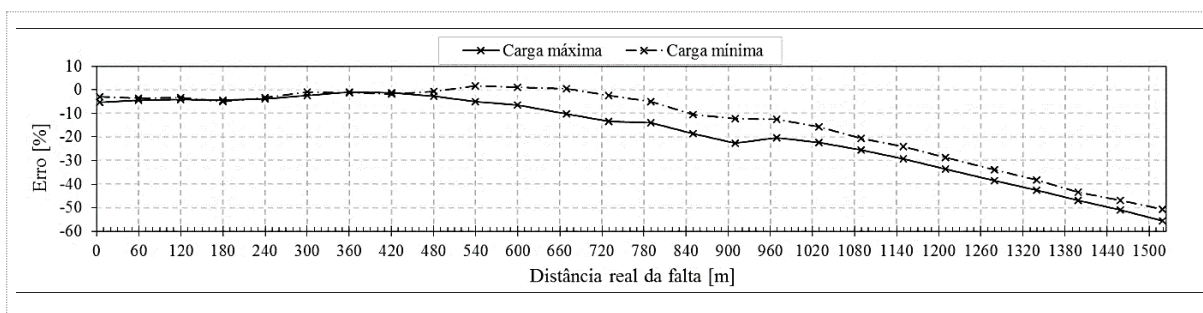


Figura 7.23 - Média do erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.

Fonte: O autor (2016).

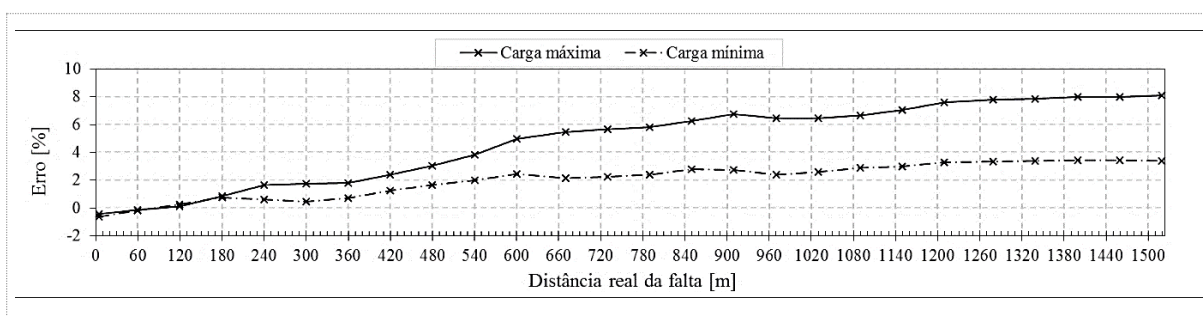


Figura 7.24 - Média do erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.

Fonte: O autor (2016).

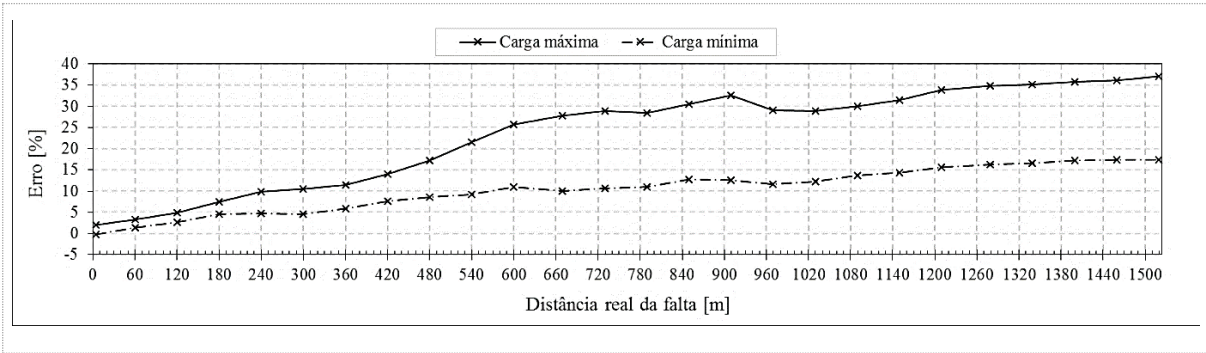


Figura 7.25 - Média do erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.
 Fonte: O autor (2016).

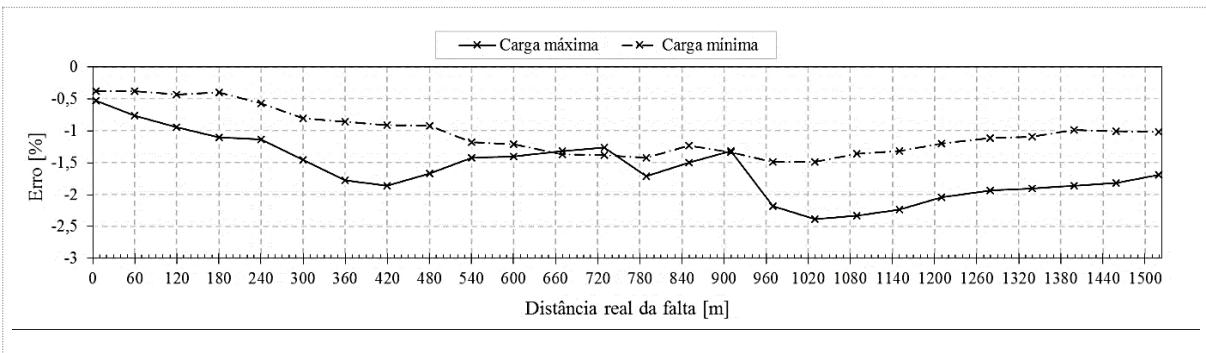


Figura 7.26 - Média do erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.
 Fonte: O autor (2016).

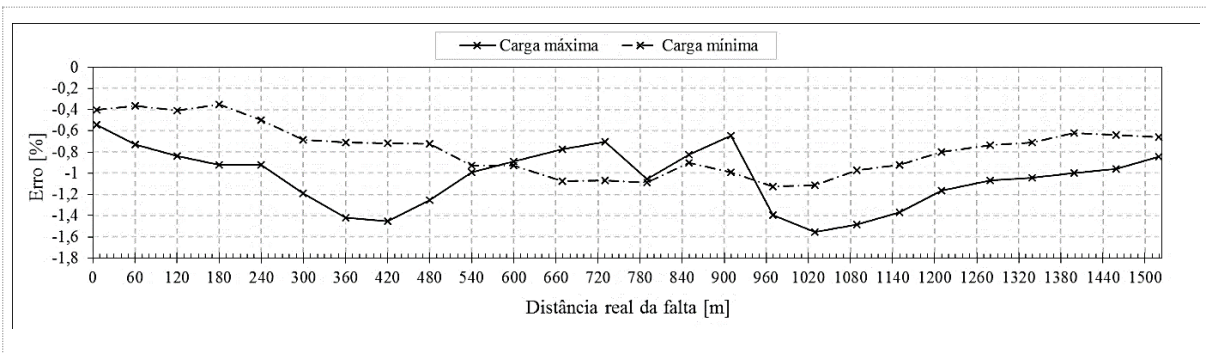


Figura 7.27 - Média do erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.
 Fonte: O autor (2016).

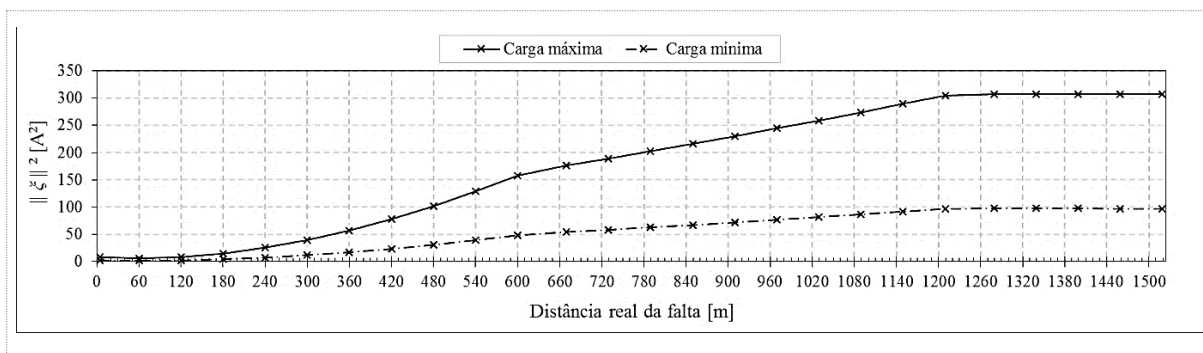


Figura 7.28 - Média da norma quadrática do resíduo da corrente de falta estimada em função da distância real da falta considerando variações no carregamento do sistema de potência.

Fonte: O autor (2016).

Os resultados apresentados da Figura 7.23 à Figura 7.28 mostram que todos os erros apresentados em função da distância real da falta são geralmente menores quando a carga é menor. Por outro lado, é possível observar uma exceção a respeito da estimativa da distância da falta quando a mesma se encontra na seção 1. Neste intervalo de distâncias, a variação da carga não mostrou uma influência apreciável nos erros cometidos. Este comportamento pode ser entendido em função da inexistência de cargas entre a barra 650 e 632 da Figura 6.3, já que a variação da carga afeta somente às correntes que fluem pelos laterais dos nós 632 e 671. Em relação ao apresentado neste estudo de caso, é possível dizer que o desempenho geral do algoritmo melhora quando o carregamento geral do sistema diminui.

7.3 ANÁLISE DA PRECISÃO GLOBAL

Os parâmetros de uma FAI dependem do meio e não podem ser controlados na prática. Por este motivo, foi gerado um conjunto aleatório de FAI considerando uma distribuição de probabilidade retangular em função dos valores máximos e mínimos mostrados na Tabela 7-7. Trinta faltas aleatórias foram geradas e apresentadas na Tabela 7-8, as quais foram simuladas em todas as distâncias expostas na Tabela 6-1, complementada com as distâncias de 604,8 m, 614,4 m, 1214,4 m e 1244 m e totalizando 900 casos.

Tabela 7-7 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150 Ω e ângulo de 20 graus

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
$Z_F [\Omega]$	50	250
$\beta [^\circ]$	5	30
$V_{Fp} [V]$	500	1700
$V_{Fn} [V]$	500	1700

Os valores de V_{Fp} e V_{Fn} foram intercambiados quando o primeiro era maior do que o segundo, mantendo a condição explicada por Emanuel et al. (1990).

Tabela 7-8 - Trinta faltas de alta impedância geradas de forma aleatória.

Id	Z_F [Ω]	β [$^\circ$]	R_F [Ω]	XL_F [Ω]	V_{Fp} [V]	V_{Fn} [V]	ΔV_F
1	71,4	6,5	70,9	8,1	539,1	850,4	311,3
2	180,8	22	167,5	67,9	1018	1173,4	155,5
3	148,8	6,1	148	15,7	518,6	1558,2	1039,7
4	205,8	6,8	204,4	24,3	1303	1680,9	377,9
5	193	18	183,5	59,8	700,6	728,5	27,9
6	230,7	7,4	228,8	29,8	627,5	942,7	315,2
7	228,2	25,5	206	98,1	946,9	1052,9	106
8	116,8	25,4	105,5	50,2	737,7	1678	940,2
9	189,7	23,1	174,6	74,3	687,7	1087,6	399,9
10	89,6	8,7	88,5	13,6	907,4	1526,6	619,2
11	56,1	21,5	52,2	20,6	1273,7	1642	368,2
12	198,8	18	189,1	61,3	951,5	1604,4	652,9
13	150	29,3	130,8	73,5	563,2	729,1	165,9
14	146	21,2	136,1	52,9	1013,9	1385,4	371,5
15	230,9	25	209,3	97,6	822,9	1078,4	255,5
16	172	16,3	165	48,4	644,7	1007,4	362,7
17	173,5	15,8	167	47,3	1157,4	1207,4	50
18	221,9	25,6	200,1	96	771,4	1631,3	859,9
19	211,1	7,1	209,5	26	961,5	1001,3	39,7
20	165,3	8,3	163,6	24	1199,6	1679,7	480,1
21	86,6	9,3	85,4	14	802,2	861,7	59,6
22	98	14,8	94,7	25	848,5	1341,3	492,8
23	227,3	25,8	204,7	98,9	1240,5	1299,6	59,1
24	55,7	25,1	50,5	23,6	818,3	1147	328,6
25	148	6,5	147	16,8	1337,7	1489,3	151,5
26	83,6	15	80,7	21,6	1299,8	1679,2	379,4
27	245,7	18,2	233,5	76,6	713,8	1376,3	662,5
28	192,5	15,4	185,6	51,2	653,6	912,7	259
29	150,1	21,4	139,7	54,8	1200,9	1698,9	498
30	144,2	20,7	134,9	51	629,3	705,3	76

Os resultados dos erros na estimativa da distância da falta e nos parâmetros da FAI são apresentados como pontos pretos nas Figura 7.29 a Figura 7.33. Estas figuras também apresentam o erro médio do resultado para cada FAI e a soma e subtração do mesmo pelo desvio padrão dos resultados. Para simplificar a exposição, o erro médio é representado como e_m e o desvio padrão como σ .

Na Figura 7.29 é possível observar que o erro médio tende a ser constante na seção 1 do sistema teste. A partir da seção 2, o erro médio apresenta um aumento com o acréscimo da distância real da falta, sendo possível advertir uma tendência linear. Dos 900 casos simulados, apenas cinquenta e três casos mostraram erros positivos na estimativa da distância da falta, indicando que no 94,1 % dos casos o resultado da estimativa da distância da falta é menor à distância real da falta. No 70 % dos casos, o erro não supera os limites definidos por $e_m \pm \sigma$. O desvio padrão se mantém aproximadamente constante ao longo das duas primeiras seções do sistema, com um valor médio de 7,3 %. A partir da seção 3, o desvio padrão aumenta a um valor médio de 11 %.

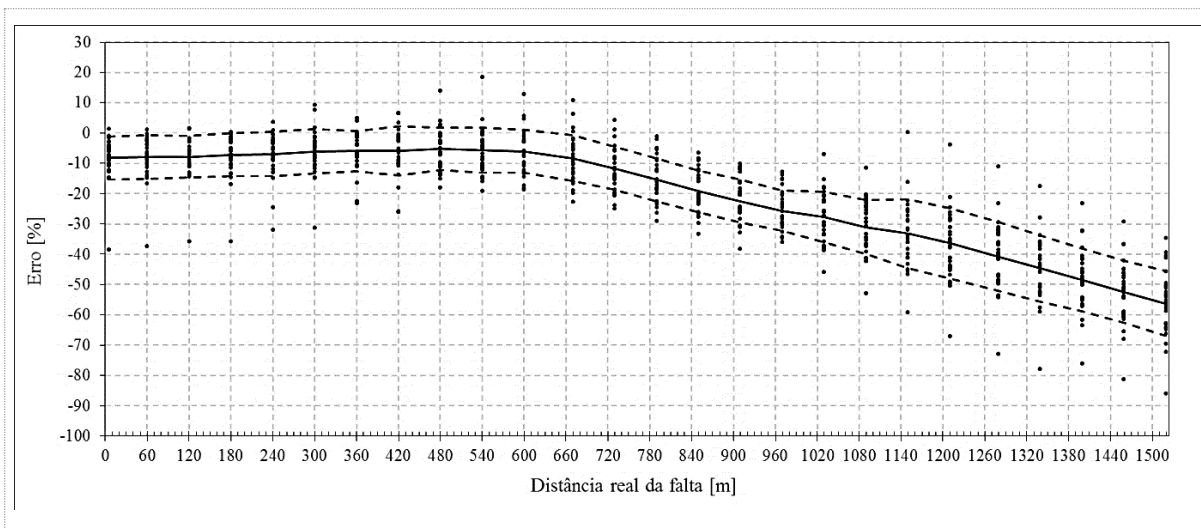


Figura 7.29 - Erro percentual da distância estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.

Fonte: O autor (2016).

A Figura 7.30 mostra a distribuição dos erros cometidos na estimativa da R_F em função da distância real da falta. É possível observar que o erro médio tende a aumentar com a distância e que existem pontos de inflexão no início da seção 2 e 3. Na seção 3, a média dos erros permanece constante com um valor aproximado de 5,7 %. A dispersão dos erros também aumenta com a distância, mostrando um desvio padrão de 0,5 % no início da linha de distribuição e de 2 % no final da seção 3. Em 93,11 % dos casos o valor estimado é superior ao valor real da R_F e no 27,1 % dos casos o erro supera os limites definidos por $e_m \pm \sigma$.

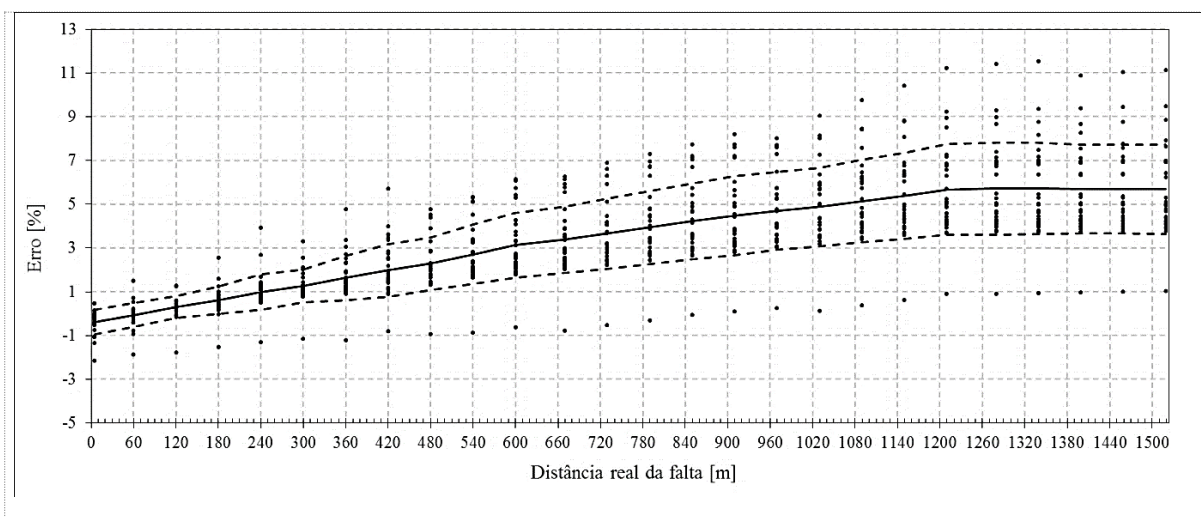


Figura 7.30 - Erro percentual da R_F estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.

Fonte: O autor (2016).

A Figura 7.31 mostra a distribuição dos erros cometidos na estimativa da L_F em função da distância da falta. Da mesma forma que na estimativa de R_F , possível observar que o erro

médio tende a aumentar com a distância real da falta e que existem pontos de inflexão no início da seção 2 e 3. Na seção 3, a média dos erros permanece constante por volta de 33 % aproximadamente. A dispersão dos erros também aumenta com a distância, mostrando um desvio padrão dos erros de 2,3 % no início da linha de distribuição, aumentando até 15 % no final da seção 3. Os 99,6 % dos casos apresenta uma estimativa da L_F superior ao seu valor real e no 35,77 % dos casos erros superam os limites definidos por $e_m \pm \sigma$.

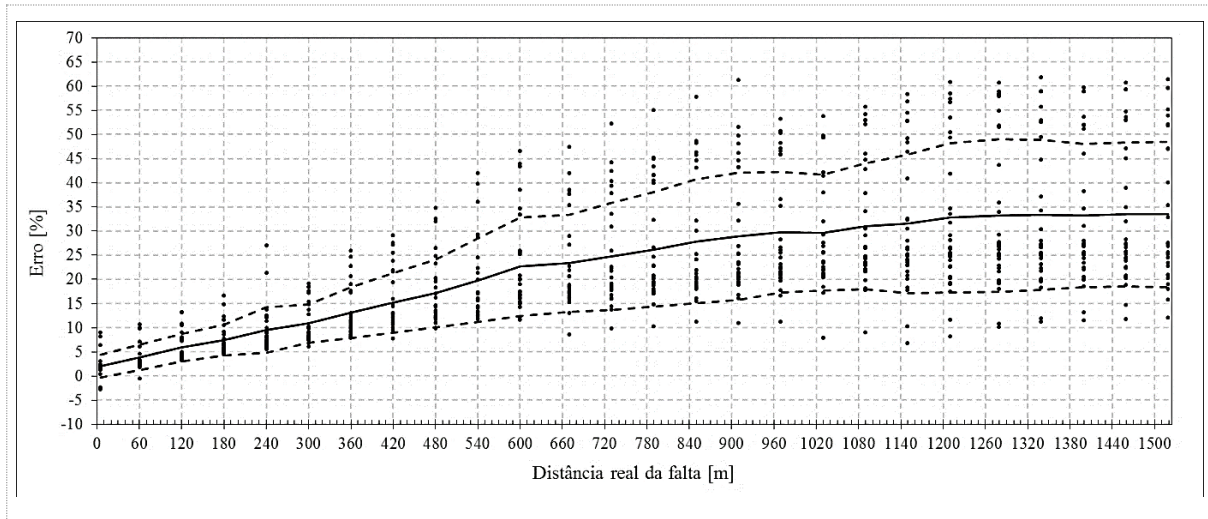


Figura 7.31 - Erro percentual da L_F estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.

Fonte: O autor (2016).

As Figura 7.32 e Figura 7.33 mostram a distribuição dos erros cometidos na estimativa da V_{Fp} e da V_{Fn} em função da distância real da falta. A respeito da estimativa de V_{Fp} , é possível observar um pequeno aumento do erro médio com o acréscimo da distância da falta até o final da seção 1. Este erro médio mostra uma tendência constante quando as FAI se encontram nas seções 2 e 3 do sistema. O valor mínimo do erro médio absoluto pode ser observado em 0,58 % e o máximo em 1,9 %. A estimativa da V_{Fn} mostrou um comportamento médio com tendência constante para as faltas em todo o sistema, oscilando entre os valores de -0,54 % e -1 %. Em ambos os casos, a dispersão dos resultados aumenta com a distância até finalizar a seção 1, permanecendo relativamente estável quando as FAI estão nas seções 2 e 3 do sistema. O desvio padrão mínimo para V_{Fp} é de 0,7 % e o máximo de 2 %. Por outro lado, o desvio padrão mínimo para V_{Fn} é de 0,64 % e o máximo de 1,74 %. No caso da estimativa de V_{Fp} , o 21,5 % dos casos apresenta uma superestimação do parâmetro e o 40,33 % dos casos mostra erros superiores ao limiar definido por $e_m \pm \sigma$. Já para o caso da estimativa de V_{Fn} , o 30,66 % dos casos apresenta uma superestimação do parâmetro e o 38,88 % dos casos mostra erros superiores aos limites definidos por $e_m \pm \sigma$.

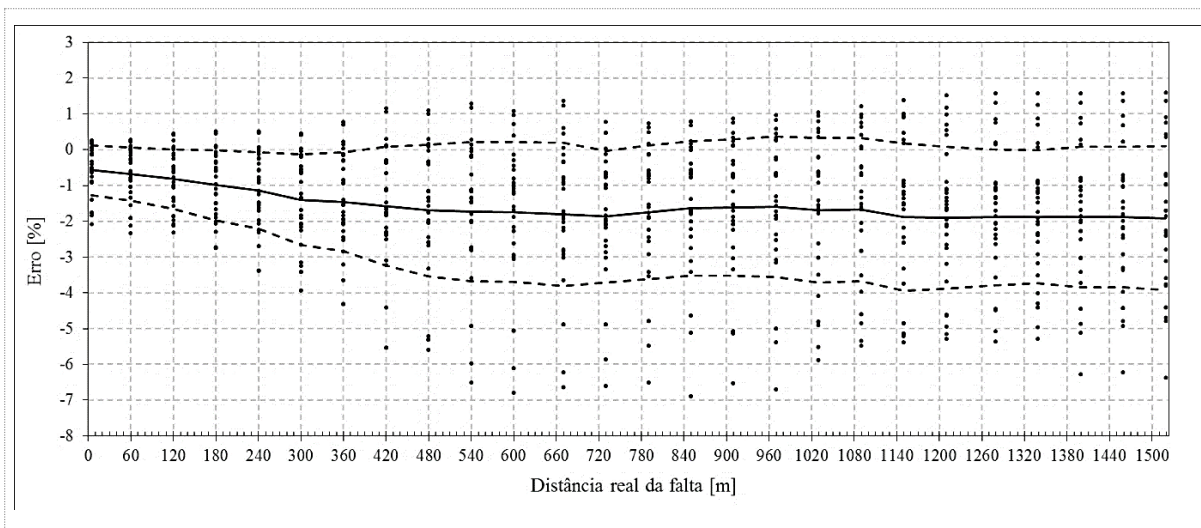


Figura 7.32 - Erro percentual da V_{Fp} estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.

Fonte: O autor (2016).

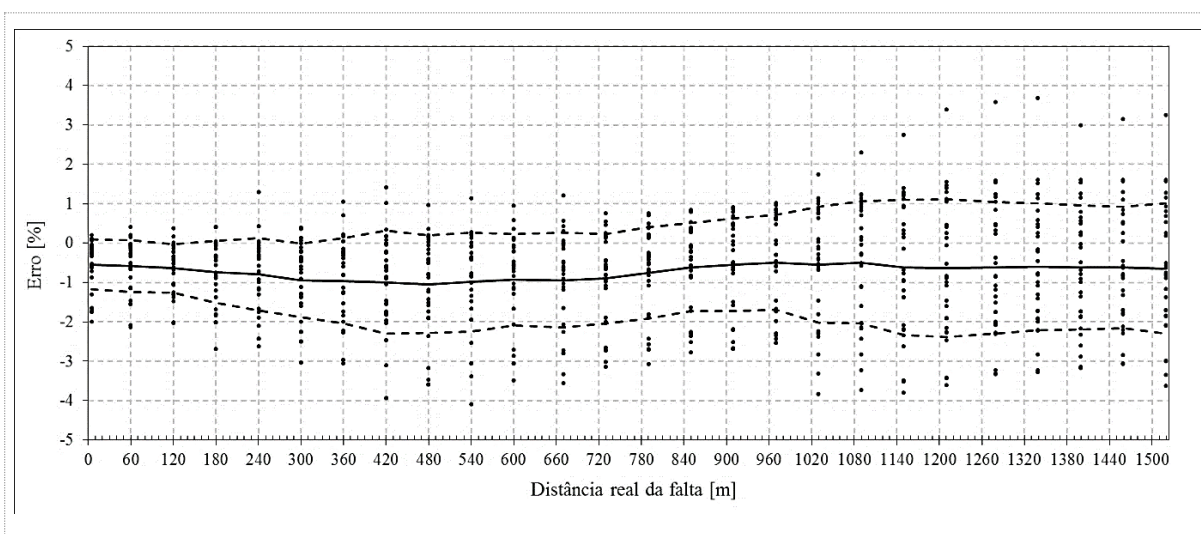


Figura 7.33 - Erro percentual da V_{Fn} estimada em função da distância real da falta considerando 30 variações aleatórias dos parâmetros da falta de alta impedância. Linha cheia: erro médio; linhas tracejadas: desvio padrão mais e menos o valor médio; pontos: erros correspondentes a cada caso.

Fonte: O autor (2016).

Na Tabela 7-9 se expõe o desempenho geral do algoritmo quando a totalidade dos casos simulados segundo a Tabela 7-8 são considerados e incluindo todas as distâncias em que as faltas foram aplicadas. Observando a Tabela 7-9, é possível verificar que a técnica proposta para LDFAI mostra uma marcada tendência a subestimar a distância da falta, apresentando um erro médio global de -21 % e desvio padrão médio global de 18,5 %. Em termos de distância, isto significa que a distância estimada pode ter um erro de $-320 \pm 281,9$ m. As estimativas da R_F e da L_F mostraram uma marcada tendência à superestimação, sendo observado que a

estimativa da R_F é muito mais exata e precisa que a estimativa da L_F . As estimativas de V_{Fp} e V_{Fn} tendem em média a ser menores do que o valor real do parâmetro. Entretanto no 21,5 % e 30,7 % dos casos são observados erros positivos na estimativa da V_{Fp} e da V_{Fn} , respectivamente, constituindo uma parte apreciável dos resultados.

Tabela 7-9 - Desempenho global da técnica proposta

Parâmetro	Erros positivos [%]	Erros negativos [%]	Erros dentro $e_m \pm \sigma$ [%]	Erros fora $e_m \pm \sigma$ [%]	Média global dos erros [%]	σ global dos erros [%]
x	5,9	94,1	70,0	30,0	-21,0	18,5
R_F	93,1	6,9	72,9	27,1	3,5	2,4
L_F	99,6	0,4	64,2	35,8	23,0	14,7
V_{Fp}	21,5	78,5	59,7	40,3	-1,6	1,8
V_{Fn}	30,7	69,3	61,1	38,9	-0,7	1,3

7.4 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA TÉCNICA PROPOSTA COMO MÉTODO PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

A implementação da técnica de LDFAI foi proposta por meio de uma janela móvel, segundo o AMQL, capaz de fornecer resultados em função do tempo. Por este motivo, considera-se importante avaliar a possibilidade de utilizar a abordagem proposta como uma técnica de detecção e classificação de FAI. Neste contexto, os resultados desta análise são importantes para conhecer o comportamento da formulação proposta para LDFAI quando a mesma resulta insatisfatória. Nesta análise, foi considerado novamente o sistema teste da IEEE de 13 barras apresentado na Figura 7.34. Neste diagrama são mostrados quatro pontos numerados dentro de círculos vermelhos, indicando que em cada local foi simulada uma FAI e um evento diferente a uma FAI. Neste contexto, o objetivo dos testes consiste em avaliar o comportamento do AMQL para ambos eventos e verificar se existem diferenças apreciáveis no comportamento do algoritmo. Por outro lado, no ponto 4 da Figura 7.34 apenas a FAI foi simulada, com o intuito de avaliar o comportamento do algoritmo considerando que existem RDP sincronizados e alocados nas barras 650, 632 e 671 (como indicam as setas tracejadas na Figura 7.34). Deste modo, será verificada a possibilidade de localizar a falta dentro de uma zona definida por cada RDP mediante uma filosofia de proteção lógica.

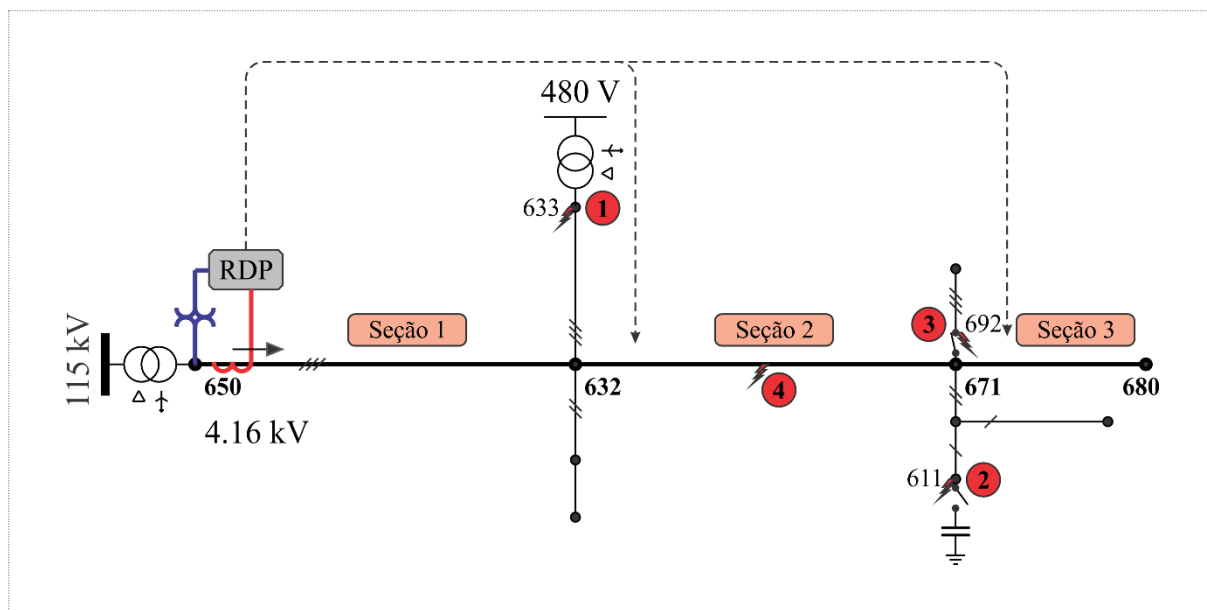


Figura 7.34 - Diagrama do sistema IEEE de 13 barras. Os números em círculos indicam os locais dos eventos analisados.

Fonte: O autor (2016).

A Tabela 7-10 apresenta os parâmetros da FAI que foi simulada em cada um dos locais mostrados na Figura 7.34.

Tabela 7-10 - Variações das tensões de arco. Impedância de falta de 150 Ω e ângulo de 20 graus

R_F [Ω]	X_{LF} [Ω]	V_{Fp} [V]	V_{Fn} [V]	ΔV_F [V]
98	18	500	1000	500

Os eventos que serão contrastados com a ocorrência da FAI são listados e descritos a seguir:

- evento 1: falta fase *a* na barra 633 e energização do transformador de distribuição localizado na mesma barra;
- evento 2: falta na fase *c* na barra 611 e energização do capacitor monofásico de 100 kVAR localizado na fase *c* da mesma barra;
- evento 3: falta na fase *b* na barra 692 e conexão do interruptor entre a barra 671 e 692, a linha que parte da barra 692 possui uma carga total de 1013 kW e 613 kVAR ;
- evento 4: falta na fase *b* na metade da seção 2 do sistema para analisar a estimação dos parâmetros realizada por três RDP alocados no início de cada seção, barras 650 (subestação), 632 e 671.

Como o objetivo das análises apresentadas nesta Seção são dirigidos à detecção de eventos, o qual deve ser realizado em tempo real, a janela utilizada para executar o algoritmo foi de meio ciclo da frequência fundamental. Como foi demonstrado nas análises realizadas nas

seções anteriores, a estimativa da distância da falta apresenta em geral um comportamento muito sensível em relação aos parâmetros da FAI, localização da falta e carregamento do SEP. O valor da distância que foi estimado na avaliação dos eventos explicados acima não apresentou valores considerados representativos. No entanto, como a estimação da distância não é o foco nos seguintes teste, a mesma será omitida nas figuras e análises.

7.4.1 Discriminação entre energização de um transformador e uma FAI

Na Figura 7.35 são apresentados os resultados da estimativa dos parâmetros em função do tempo correspondentes à FAI aplicada na fase *a* e no ponto 1 do sistema de potência ilustrado na Figura 7.34. Na figura é possível apreciar que a estimativa inicial da V_{Fp} é zero, pois neste intervalo a corrente de falta possui apenas valores negativos dentro da janela (J1). Além disso, também são observadas descontinuidades na estimativa dos parâmetros a cada 15,4 ms aproximadamente, isto pode ser explicado porque a janela utilizada na análise é menor que um ciclo de frequência fundamental. Portanto, existem instantes em que a corrente de falta estimada apresenta apenas a polaridade positiva ou negativa dentro da janela de análise. Apesar da FAI ser encontrada em um lateral do sistema e, a impedância de linha considerada no AMQL pertence à da seção 1, os parâmetros da FAI são estimados com precisão aceitável. Este comportamento está de acordo com os resultados apresentados nas Seções 7.2 e 7.3.

A Figura 7.36 mostra os resultados da estimativa dos parâmetros em função do tempo correspondentes à energização do transformador trifásico no ponto 1 do sistema de potência ilustrado na Figura 7.34. Na Figura, é possível observar um transitório no momento da conexão do equipamento, o qual some em um tempo aproximado de 11,3 ms. Após deste transitório, o valor da R_F permanece com valores superiores a 1000 Ω e a L_F permanece com valores negativos, inferiores a 500 Ω (valores fora da escala da figura). A estimativa da V_{Fp} e da V_{Fn} permanecem iguais a zero depois do transitório.

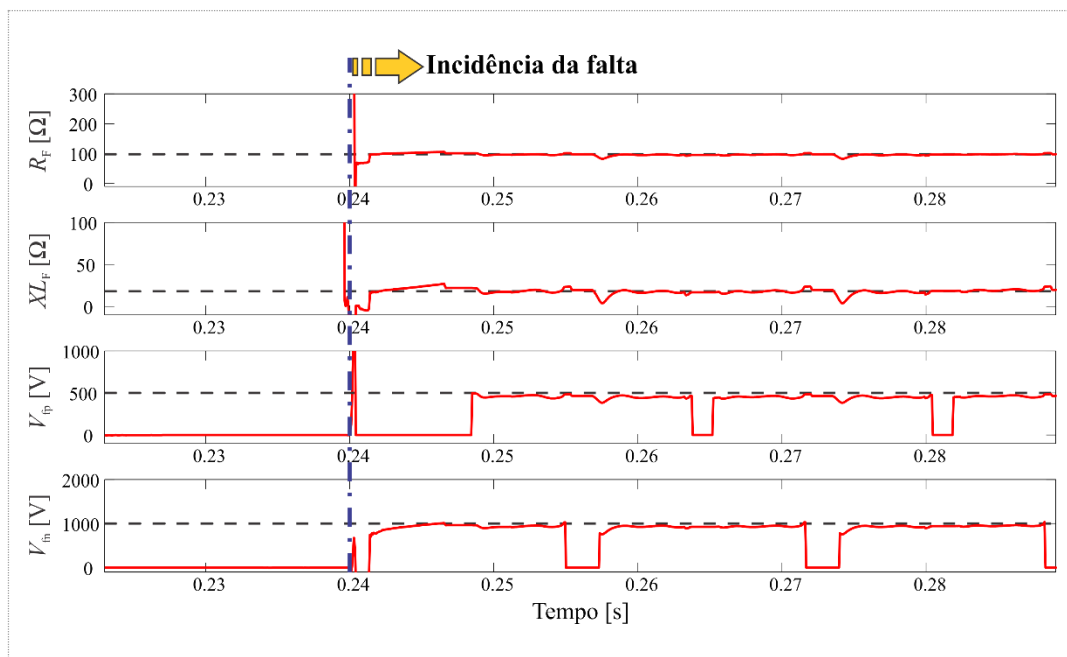


Figura 7.35 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase a.

Fonte: O autor (2016).

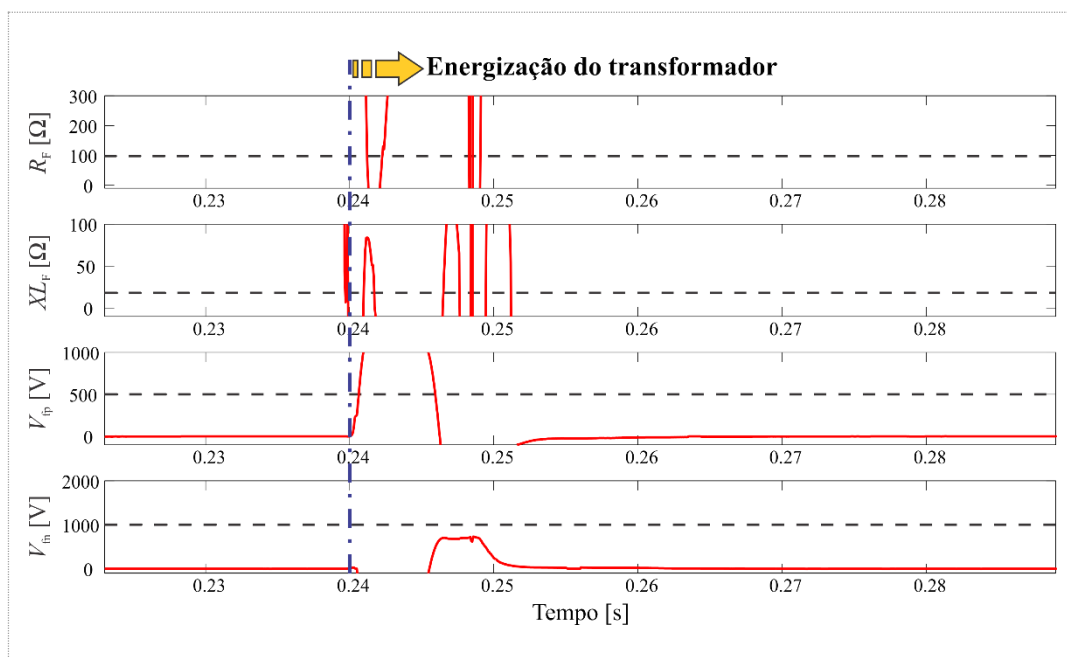


Figura 7.36 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para a energização de um transformador.

Fonte: O autor (2016).

7.4.2 Discriminação entre energização de um capacitor e uma FAI

A Figura 7.37 apresenta o resultado na estimativa temporal dos parâmetros para uma FAI aplicada na fase *c*, no ponto 2 do sistema ilustrado na Figura 7.34. Neste caso, todos os parâmetros da FAI são estimados e as observações possíveis são muito similares às realizadas em relação à Figura 7.35.

Figura 7.38 mostra o comportamento temporal na estimativa dos parâmetros da FAI quando um capacitor monofásico de 100 kVAR é conectado na fase *c* e no ponto 2 do sistema de potência apresentado na Figura 7.34. É possível ver que no instante da conexão, as estimativas da R_F e L_F chegam a ser próximas de zero e tendem para valores negativos com o passar do tempo. Os parâmetros V_{Fp} e V_{Fn} oscilam entre valores positivos e negativos de valor absoluto elevado, apresentando também uma atenuação ao longo do tempo.

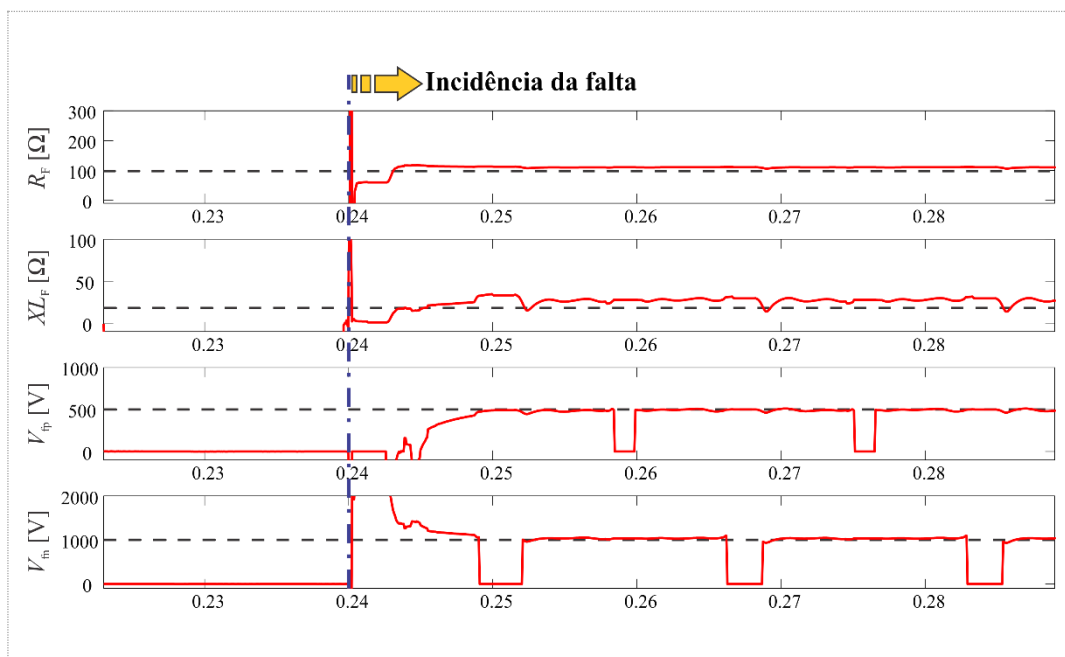


Figura 7.37 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase *c*.

Fonte: O autor (2016).

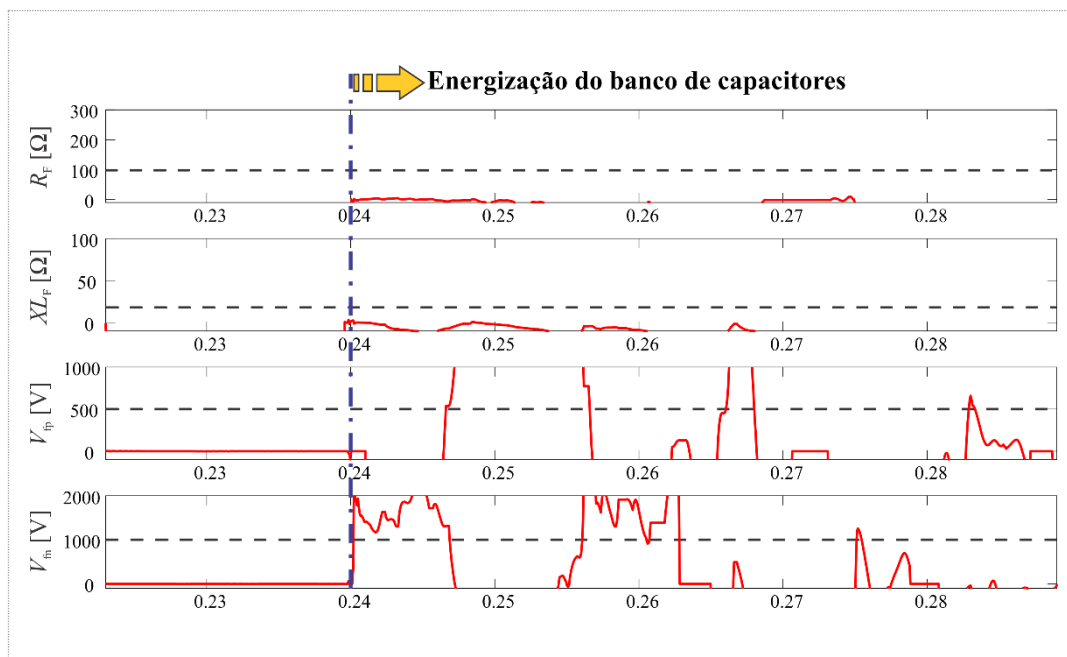


Figura 7.38 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para a energização de um banco de capacitores.

Fonte: O autor (2016).

7.4.3 Discriminação entre energização de uma linha com carga e uma FAI

Na Figura 7.39 são mostrados os resultados da estimativa temporal dos parâmetros para uma FAI aplicada na fase *b* e no ponto 3 do sistema de potência ilustrado na Figura 7.34. Neste caso, todos os parâmetros da FAI são corretamente estimados e as possíveis observações são muito similares às realizadas para a Figura 7.35.

A Figura 7.40 mostra a evolução temporal na estimativa dos parâmetros quando o interruptor trifásico é fechado no ponto 3 do sistema de potência em questão. As estimativas da R_F e L_F mostram um transitório inicial até 26 ms aproximadamente, durando cerca de 20 ms. Depois deste período, a R_F estimada apresenta valores negativos e a L_F estimada mostra valores positivos. Em ambos os casos é possível apreciar que as estimativas vão diminuindo lentamente com o passar do tempo. Na estimativa do parâmetro V_{Fp} é possível observar um transitório impulsivo de polaridade positiva, que volta a zero no instante de 0,254 s, aproximadamente. A estimativa do parâmetro V_{Fn} apresenta o mesmo efeito observado na estimativa da V_{Fp} , porém, com um transitório impulsivo de polaridade negativa.

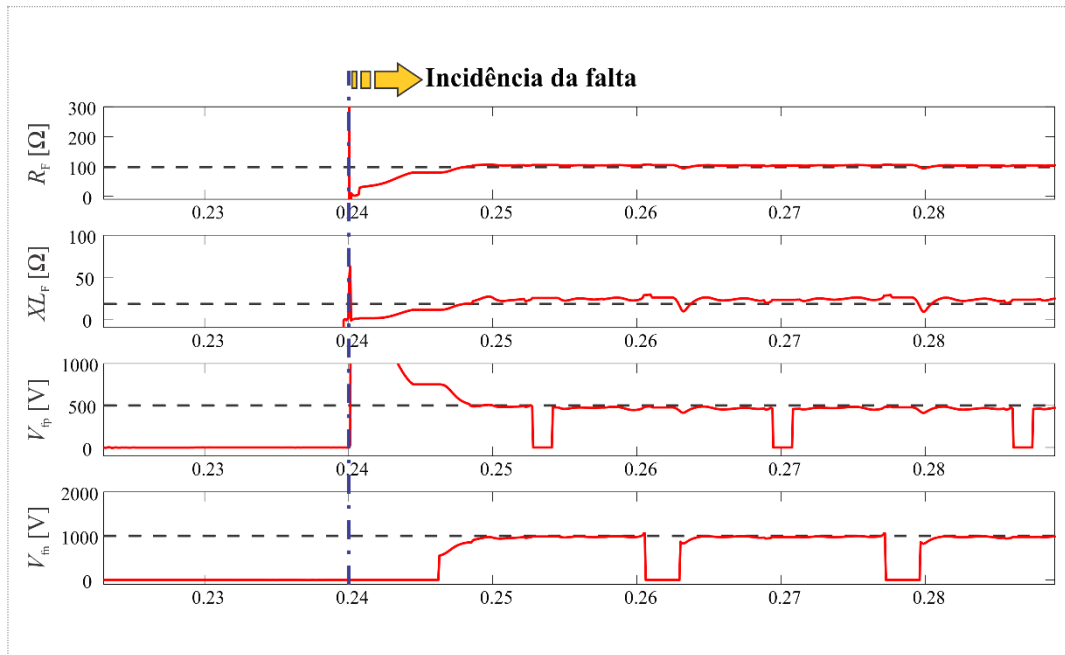


Figura 7.39 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase b.

Fonte: O autor (2016).

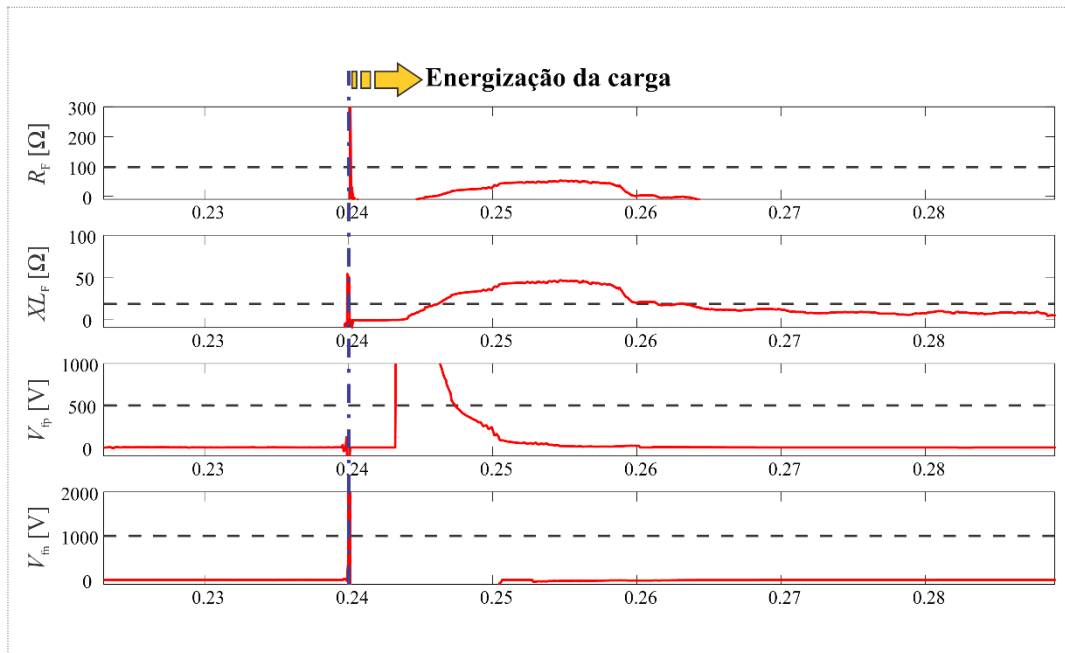


Figura 7.40 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para a energização de um ramal com carga.

Fonte: O autor (2016).

7.4.4 Localização da seção em falta mediante monitoramento distribuído

Neste caso, a FAI foi inserida na fase *b*, na metade da seção de linha número 2 do sistema apresentado na Figura 7.34. O AMQL foi aplicado com sinais de tensão e corrente provenientes da simulação, dos inícios das seções 1, 2 e 3. Neste contexto, a Figura 7.41 mostra as estimativas obtidas com o algoritmo aplicado na barra 650, a Figura 7.42 mostra as estimativas obtidas com o algoritmo aplicado na barra 632 e a Figura 7.43 mostra as estimativas obtidas com o algoritmo aplicado na barra 671. As correntes utilizadas no ALMQL foram as correntes que estavam saindo das barras, no sentido da barra a jusante. Analisando as figuras, é possível observar que os resultados obtidos nas barras 650 e 632 mostram estimativas estáveis para os parâmetros da FAI. Já as estimativas obtidas na barra 671 mostraram um comportamento errático, oscilando fortemente entre valores positivos e negativos de elevado valor absoluto. Como as barras 650 e 632 estão a montante da falta e a barra 671 está a jusante, é possível deduzir que a FAI se encontra dentro da seção 2 do sistema de potência analisado ou, em algum dos laterais que saem do nó 671.

Os resultados mostrados nesta subseção permitem a seguinte conclusão: se existe a possibilidade de instalar RDP nos inícios das seções principais do SDEE, com canais de comunicação entre os mesmos, é possível detectar a FAI e identificar a zona do sistema onde a mesma se encontra.

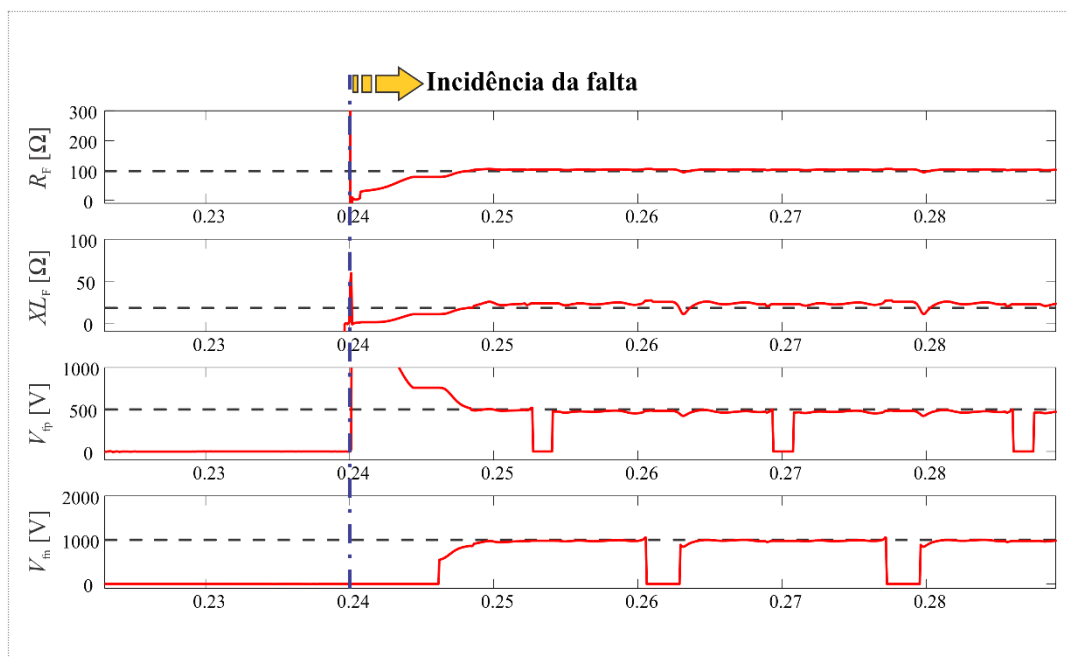


Figura 7.41 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição na subestação, para uma FAI na fase *b* na seção 2 do sistema IEEE 13 barras.

Fonte: O autor (2016).

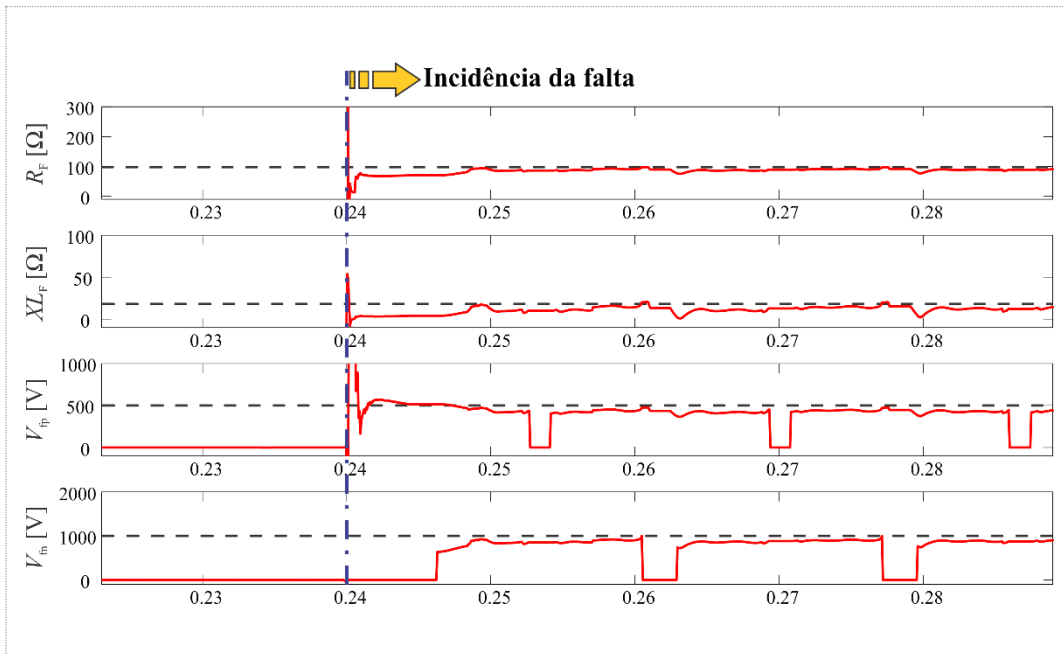


Figura 7.42 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição no início da seção 2, para uma FAI na fase b na seção 2 do sistema IEEE 13 barras.
Fonte: O autor (2016).

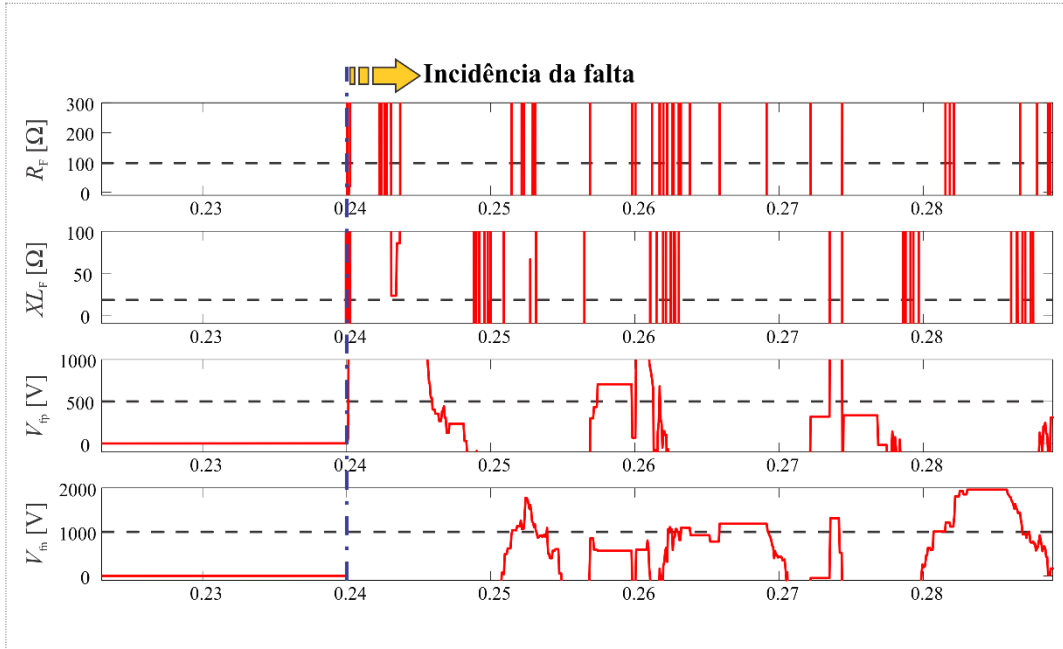


Figura 7.43 - Estimação de parâmetros mediante o algoritmo de MQL, com medição no início da seção 3, para uma FAI na fase b na seção 2 do sistema IEEE 13 barras.
Fonte: O autor (2016).

7.5 ANÁLISE GERAL E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foram apresentados os resultados obtidos nos estudos de casos, realizados para avaliar o desempenho da técnica de LDFAI proposta nesta tese. Para isso, os estudos de casos foram divididos em 3 grupos: comparação entre o AMQL e o AMQNL, análise de sensibilidade, e análise da precisão global. Um quarto grupo foi criado para analisar, de forma qualitativa, o potencial da técnica proposta para outros usos, tais como a detecção e a classificação de FAI. Um resumo dos resultados e análises descritos nas seções anteriores é apresentado a seguir.

7.5.1 Comparação entre os algoritmos de mínimos quadrados linear (AMQL) e não linear (AMQNL)

A exposição realizada na Seção 7.1 mostra que tanto o AMQNL quanto o AMQL apresentaram os mesmos resultados no intervalo de tempo de interesse, onde a média é calculada para obter a estimativa final da distância da falta e dos parâmetros da FAI. Embora não tenham sido apresentados resultados generalizados, a coincidência no comportamento dos algoritmos foi verificada para todas as simulações de FAI realizadas neste trabalho. Por esta razão, a apresentação e análise de todos os resultados foi feita considerando apenas o AMQL, o qual não considera a capacitância da linha de transmissão. O AMQNL poderia apresentar diferenças em relação ao AMQL em casos onde a capacitância da linha não possa ser desprezada. Entretanto, como este trabalho está dirigido a linhas de distribuição aéreas e curtas, não foram realizados testes para verificar esta hipótese.

7.5.2 Estimativa da distância da falta

Os casos apresentados para analisar a sensibilidade do AMQL mostraram uma tendência geral a subestimar a distância da falta. Ainda, é possível verificar sensibilidade na estimativa da distância da falta em relação ao módulo e ângulo da Z_F , sendo que os acréscimos destes parâmetros contribuem a subestimar a distância da falta. As variações realizadas na ΔV_F não mostram uma influência significativa na estimativa da distância da falta, exceto para as FAI localizadas na seção 3 do sistema de potência. Dentro desta seção é possível verificar um aumento do erro a respeito do acréscimo da ΔV_F , fato associado ao leve incremento no resíduo relacionado à estimativa da corrente de falta. As variações do ângulo de incidência da falta não mostram influência apreciável na estimativa da distância da falta. Por outro lado, a variação do

carregamento afeta de forma apreciável a estimativa da distância da falta, melhorando a mesma quando a carga do sistema de potência é menor.

Em média, os erros na estimativa da distância da falta são relativamente elevados, com tendência a aumentar com a distância real da falta a partir do início da seção 2 do sistema de potência analisado. Isto se deve à existência de laterais com cargas instaladas no início da seção 2, os quais não são considerados na abordagem proposta para LDFAI. Contudo, mediante análise global apresentada na Seção 7.3 é possível apreciar que 18 % dos casos mostrou um erro na estimativa menor a 5 %.

7.5.3 Estimativa dos parâmetros da falta de alta impedância

Em relação à estimativa dos parâmetros da FAI, é possível observar um bom desempenho geral do AMQL. Os erros cometidos nas estimativas da R_F e L_F tendem a aumentar com a distância real da falta e tendem a diminuir com o acréscimo do ângulo da Z_F . Entretanto, não é possível apreciar uma variação considerável na estimativa destes parâmetros com as variações realizadas do módulo da Z_F . As estimativas da R_F e L_F , em geral tendem a ser maiores ao valor real do parâmetro, indicando uma tendência à superestimação.

As estimativas da V_{Fp} e V_{Fn} apresentam sempre erros absolutos próximos a 0 %, não superando o 7 % no caso da estimativa da V_{Fp} e não superando o 4 % na estimativa da V_{Fn} . Em geral, não é apreciável uma variação significativa nos erros cometidos em função da distância real da falta. A análise de sensibilidade não mostra variações apreciáveis na estimativa destes parâmetros com as variações realizadas da Z_F , ΔV_F , o carregamento do sistema de potência e o ângulo de incidência da FAI. A análise global mostrou uma tendência à subestimação, com um erro médio de -1,6 % na estimativa da V_{Fp} e de -0,7 % na estimativa da V_{Fn} .

7.5.4 Avaliação qualitativa da proposta como método de detecção e classificação de faltas de alta impedância

A análise realizada na Seção 7.4 mostra diferenças consideráveis quando o AMQL é aplicado aos sinais provenientes das simulações de FAI e outros eventos. Sendo assim, é verificada a possibilidade de diferenciar visualmente uma FAI de uma energização de um transformador de distribuição, de um capacitor ou de um ramal com carga. Além disso, as estimativas dos parâmetros da FAI mudam em forma abrupta no instante de incidência da FAI ou do evento, deixando claro o potencial do AMQL como detector de FAI.

Os resultados apresentados na Seção 7.4 também apresentam as estimativas dos parâmetros da FAI realizada com sinais provenientes de distintos pontos do SDEE. A comparação dos resultados mostra uma diferença significativa entre os resultados obtidos com RDP localizados a montante e a jusante da FAI, demonstrando o potencial do AMQL para localizar a zona em falta, sem que seja necessária a estimativa da distância da falta.

8 CONCLUSÕES

Apesar do avanço nas últimas décadas de pesquisas relacionadas à localização de faltas em SDEE, o estudo do efeito das FAI de natureza não linear, no que se refere à tensão em função da corrente, apresenta uma lacuna a ser explorada em maior profundidade. Do ponto de vista teórico, as técnicas baseadas em medições em múltiplos terminais, ou monitoramento distribuído, apresentam uma simplificação atrativa para localizar a zona em falta. Quanto maior o número de terminais monitorados de forma sincronizada, maior pode ser o desempenho deste tipo de técnica. Apesar da crescente tendência a utilizar medições distribuídas de fasores nos SEP, os localizadores de FAI precisam dos sinais completos valores de tensão e corrente e não apenas os seus fasores de frequência fundamental. Neste contexto, o aumento da quantidade de nós monitorados acarreta um aumento da transmissão e, conseqüentemente, aumento de armazenamento de dados e de custos de instalação e manutenção que, dificilmente são justificados em nível de SDP. Por esta razão, é desejável o desenvolvimento de métodos capazes de LDFAI com medições na menor quantidade possível de terminais, sendo o caso ideal com medições realizadas apenas na SED. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver equações que incorporem um modelo de FAI característico dos SDP, particularmente para localizar FAI que foram previamente detectadas, utilizando medições de tensão e corrente obtidas em um terminal.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica do Capítulo 2, observa-se que uma FAI, apesar de sua ocorrência ser detectada, não pode ser localizada a partir de uma expressão que não considera seu efeito não linear. A desconsideração do efeito não linear da FAI representa a principal limitação dos métodos convencionais para LDFAI em SEP, em particular nos SDP, onde existe a maior probabilidade de existência de FAI devido ao seu nível de tensão nominal (entre 13,8 a 34,5 kV, ver Anexo A). Desta forma, observa-se que a proposição de um algoritmo de LDFAI em SDEE, baseado em medições realizadas em um terminal, representa uma contribuição relevante e inovadora para o desempenho prático e teórico dos localizadores de faltas. Sendo assim, a metodologia proposta neste trabalho (Capítulo 5) apresenta uma forma de estimar a distância em que a falta se encontra, considerando em particular o modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990), mediante o EMQ. Este modelo também permite estimar os parâmetros que constituem o modelo de FAI adotado. A estimação da distância e dos parâmetros da FAI pode ser realizada considerando a capacitância da linha, mediante o AMQNL ou, desconsiderando a capacitância da linha, mediante AMQL. No desenvolvimento

destes algoritmos foram resolvidas questões sobre a estimativa da corrente de falta, estimativas das derivadas, escolha de amostras e resolução estável do EMQ mediante SVD.

Nos resultados apresentados no Capítulo 7, foi explorado o desempenho da técnica proposta na estimação da distância da falta e dos parâmetros do modelo de FAI, sendo estes a resistência da falta, a indutância da falta, a tensão positiva de arco e a tensão negativa de arco. Em relação à análise global do desempenho, com erros relativamente baixos na estimativa dos parâmetros da FAI, é possível observar um erro considerável na distância estimada. Verifica-se também que entre os parâmetros estimados da FAI, a indutância da falta apresenta o maior erro associado. Isto leva a entender que a distância da falta e a indutância da falta, que são parte da equação (5.21), a qual indica o valor do resíduo em função dos parâmetros e da distância da FAI, não apresentam uma influência significativa na variação do resíduo. É importante salientar também, que a derivada da corrente de falta aparece na matriz de regressores \mathbf{X} , tanto na coluna correspondente à distância quanto à indutância da falta e, em geral, esta derivada apresenta valores consideráveis. Este fato correlaciona, em certo grau, duas colunas de \mathbf{X} e aumenta o índice de condicionamento desta matriz. Isto é uma característica natural do equacionamento realizado em base às leis de Kirchhoff.

Considerando a análise de sensibilidade, é possível observar que a estimativa da distância da falta melhora quando o módulo e ângulo da impedância de falta diminuem, chegando a estimativas com erros menores ao 5 %. O desempenho geral do algoritmo melhora quando o carregamento geral do sistema diminui, já que a corrente de falta é estimada com maior exatidão. Outra importante característica da técnica proposta é que a estimativa da distância e dos parâmetros da FAI não mostra uma variação perceptível do desempenho quando o ângulo de incidência da falta varia.

A avaliação da técnica proposta com diferentes eventos, diferentes a FAI, mostram que a mesma pode ser utilizada para o desenvolvimento de um detector e classificador de FAI.

São poucas as propostas existentes na literatura para LDFAI em SDEE, neste contexto, os avanços conseguidos nesta área de conhecimento e apresentados neste trabalho, consistem em uma contribuição relevante e inovadora.

8.1 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido nesta tese mostra importantes contribuições para a solução do problema de LDFAI em sistemas de distribuição, cujos estudos de casos abrangeram uma análise de sensibilidade e análise da precisão global mediante um grande número de simulações. Espera-se que este trabalho seja o primeiro passo para chegar à solução completa da LDFAI

baseada em medições a um terminal. Por este motivo, a seguir são apresentadas as perspectivas e sugestões para a realização de próximos trabalhos, visando aperfeiçoar a técnica proposta nesta tese:

- considerar outras maneiras de selecionar as amostras a serem utilizadas para estimar a distância da e os parâmetros da FAI, sem o uso do limiar baseado no valor máximo da corrente de falta estimada;
- avaliar a técnica proposta com outros tipos de linhas de transmissão, com maior capacitância e mais longas;
- desenvolver um algoritmo para detectar e classificar FAI de forma automática;
- avaliar a possibilidade de utilizar a técnica proposta em conjunto com medições distribuídas de tensão e corrente, possibilitando poder localizar a FAI dentro de uma zona provável

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8:** qualidade da energia elétrica, Seção 8.0: introdução e conciuatuação. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M?dulo8_Revis?o_4.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2013.
- AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas:** técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- AIEE COMMITTEE REPORT. Bibliography and Summary of Fault Location Methods. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III:** power apparatus and systems, New York, v.74, n.3, p.1423-1428, Jan. 1955.
- ALAMUTI, M. M. et al. Intermittent Fault Location in Distribution Feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.27, n.1, p.96-103, Jan. 2012.
- AUCOIN, B. M.; RUSSELL, B. D. Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [Piscataway], v.101, n.6, p.1596-1606, Jan. 1982.
- AUCOIN, M.; RUSSELL, B. D. Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals near 60 HZ. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.2, n.2, p.342-348, June 1987.
- BONEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative Transients Program: ATP-EMTP.** Portland, 2007. (Programa de computador)
- BORGHETTI, A. et al. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [Lausanne], v.28, n.9, p.608-617, Nov. 2006.
- BORGHETTI, A. et al. Continuous-Wavelet Transform for Fault Location in Distribution Power Networks: Definition of Mother Wavelets Inferred From Fault Originated Transients. **IEEE Transactions on Power Systems**, [Piscataway], v.23, n.2, p.380-388, May 2008.
- BORGHETTI, A. et al. Integrated Use of Time-Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Networks: Theory and Experimental Validation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.25, n.4, p.3139-3146, Oct. 2010.
- BRETAS, A. S. et al. A Novel High Impedance Fault Location for Distribution Systems Considering Distributed Generation. In: IEEE/PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2., 2006, Caracas. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006. p. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4104554>>. Acesso em:

15 out. 2012

BROWNE, T. E. A Study of A-C Arc Behavior Near Current Zero by Means of Mathematical Models. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, [Piscataway], v.67, n.1, p.141-153, Jan. 1948.

BULTER, K. L. et al. Characterization of electrical incipient fault signature resulting from tree contact with electric distribution feeders. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1999. p.408-413

CHOI, M. S. et al. A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.19, n.1, p.35-41, Jan. 2004.

CHOI, M. S. et al. A Direct Three-Phase Circuit Analysis-Based Fault Location for Line-to-Line Fault. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.22, n.4, p.2541-2547, Oct. 2007.

DAILY, W. K. Engineering justification for tree trimming: power system maintenance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.14, n.4, p.1511-1518, Oct. 1999.

DAS, R. . **Determining the Location of Faults in Distribution Systems**. 1998. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Electrical Engineering, University Of Saskatchewan, Saskatoon, 1998.

DI SANTO, K. G. et al. A review on smart grids and experiences in Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v.52, n.1, p.1072-1082, Dec. 2015.

DJURIĆ, M. B.; RADOJEVIĆ, Z. M.; TERZIJA, V. V. Time domain solution of fault distance estimation and arcing faults detection on overhead lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.14, n.1, p.60-65, Jan. 1999.

DJURIC, M. B.; TERZIJA, V. V. New approach to the arcing faults detection for fast autoreclosure in transmission systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.10, n.4, p.1793-1798, Oct. 1995.

DOS SANTOS, W. C. et al. High Impedance Faults: From Field Tests to Modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, [New York], v.24, n.6, p. 885-896, Dec. 2013.

DUBÉ, L. **Users Guide to Models in ATP**. [s.l.]: Laurent Dubé, 1996.

ELKALASHY, N. I. et al. Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, [Piscataway], v.14, n.2, p.375-383, Apr. 2007.

ELKALASHY, N. I. et al. DWT-based detection and transient power direction-based location of high-impedance faults due to leaning trees in unearthed MV networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.23, n.1, p.94-101, Jan. 2008.

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

ERIKSSON, M. et al. Multiagent-Based Distribution Automation Solution for Self-Healing Grids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [Piscataway], v.62, n.4, p.2620-2628, Apr. 2015.

GAUTAM, S.; BRAHMA. Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology. **IEEE Transactions on Power Systems**, [Piscataway], v.28, n.2, p.1226-1234, May 2013.

GAZZANA, D. S. et al. An integrated technique for fault location and section identification in distribution systems. **Electric Power Systems Research**, [s.l.], v.115, p.65-73, Oct. 2014.

GOLUB, G. H.; VAN LOAN, C. F. **Matrix computations**. 4. ed. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2013.

HØIDALEN, H. K. **ATPDraw - the graphical preprocessor to ATP**. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net/>>. Acesso em: 3 dez. 2015.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power System Relaying**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

HOU, D. Detection of high-impedance faults in power distribution systems. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE: ADVANCED METERING, PROTECTION, CONTROL, COMMUNICATION, AND DISTRIBUTED RESOURCES, 2007, Clemson. **Proceedings...**. Piscataway: IEEE, 2007. p.85-95.

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva Ltda., 2009.

IBRAHIM, D. K. et al. Unsynchronized Fault-Location Scheme for Nonlinear HIF in Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v. 25, n.2, p.631-637, Apr. 2010.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **High Impedance Fault Detection Technology**, WGD15 Report, 1996. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **Std. C37.114-2014:**

IEEE guide for determining fault location on ac transmission and distribution lines. New York, 2014. Revision of IEEE Std. C37.114-2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7024095&isnumber=7024094>>. Acesso em: 29 out. 2015.

IURINIC, L. U. et al. Transmission Lines Fault Location Based on High- Frequency Components Technique : a general formulation for estimation of the dominant frequency. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 10., 2013, Vancouver. **Proceedings...** [s.l.]: IPST, 2013. p.1-6.

JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance-revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.4, n.2, p.949-956, Apr. 1989.

JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. A practical protective relay for down-conductor faults. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.6, n.2, p.565-574, Apr. 1991.

KAGAN, N.; RABIONO DE OLIVEIRA, C. C.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

KASHYAP, N. et al. Automated Fault Location and Isolation in Distribution Grids With Distributed Control and Unreliable Communication. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [Piscataway], v.62, n.4, Apr. p.2612-2619, 2015.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeder. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. **Proceedings...** . Piscataway: IEEE, 2001. p.908-912.

KIM, C. **Lecture Notes on Fault Detection and Location in Distribution Systems**: fault location algorithms. Disponível em: <<http://www.mwfr.com/tkk10.html>>. Acesso em: 17 mar. 2014.

KIM, C. H. et al. A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.17, n.4, p.921-929, Oct. 2002.

KIM, C. J.; RUSSELL, B. D. Classification of faults and switching events by inductive reasoning and expert system methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.4, n.3, p.1631-1637, July 1989.

KIM, C.J. RUSSELL, B. D. Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders. **Electric Power Systems Research**, [s.l.], v.14, n.3, p.219-225, Jan. 1988.

LEE, S. J. et al. An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.19, n.2, p.524-532, Apr. 2004.

LUENBERGER, D.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 3. ed. Boston: Springer, 2008.

MAGNAGO F.H; ABUR A. A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1999. p.426-431.

MARTI, J. R.; LIN, J. Suppression of numerical oscillations in the EMTP power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, [Piscataway], v.4, n.2, p.739-747, May 1989.

MARTINS, L. L. et al. Automação avançada de redes de distribuição de energia elétrica : metodologia para reconfiguração automática. **Cadernos CPqD Tecnologia**, Campinas, v.10, n.1, p.7-20, jan. 2014. Disponível em: <http://www.cpqd.com.br/cadernosdetecnologia/Vol10_N1_jan_jun_2014/artigo1.html>. Acesso em: 30 out. 2015.

MATHWORKS. **Matlab**: the language of technical computing. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

NAKAGOMI, R. M. . **Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia de Energia e Automação Elétricas, 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. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, Vancouver. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001. p.1175-1180.

OLIVEIRA, H. M. DE. **Análise de Sinais para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

PETTERSON, R. et al. A microprocessor-based digital feeder monitor with high-impedance fault detection. In: ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS, 47., 1994, Texas. **Proceedings...** . Texas: General Electric, 1994. p.1-18.

RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local**. 2013. Revista do BNDES. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2927>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

RUSSELL, B. D.; MEHTA, K.; CHINCHALI, R. P. An arcing fault detection technique using low frequency current components-performance evaluation using recorded field data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.3, n.4, p.1493-1500, Oct. 1988.

SADEH, J.; BAKHSHIZADEH, E.; KAZEMZADEH, R. A new fault location algorithm for

radial distribution systems using modal analysis. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [Lausanne], v.45, n.1, p.271-278, Feb. 2013.

SALIM, R. H. . **Novos Desenvolvimentos na Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Fundamentada na Impedância**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Automação e Instrumentação Eletro-eletrônica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SALIM, R. H. et al. Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.24, n.2, p.508-516, Apr. 2009.

SALIM, R. H.; SALIM, K. C. O.; BRETAS, A. S. Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [London], v.5, n.4, p.467-478, Apr. 2011.

SANTOS, W. C. et al. High Impedance Fault Detection and Location Based on Electromagnetic Transient Analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 10., 2013, Vancouver. **Proceedings...** [s.l.]: IPST, 2013. p.1-6.

SCHWEITZER, E. O. Evaluation and development of transmission line fault-locating techniques which use sinusoidal steady-state information. **Computers & Electrical Engineering**, [s.l.], v.10, n.4, p.269-278, Jan. 1983.

SEDIGHIZADEH, M.; REZAZADEH, A.; ELKALASHY, N. I. Approaches in High Impedance Fault Detection: a chronological review. **Advances in Electrical and Computer Engineering**, [Suceava], v.10, n.3, p.114-128, Aug. 2010.

SHARAT, A. M.; SNIDER, L. A.; DEBNATH, K. A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection. In: ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT, 2., 1993, Hong Kong. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1993. p.613-620.

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

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003.

SLEPIAN, J. Extinction of an A-C. Arc. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, [Piscataway], v.47, n.4, p.1398-1407, Oct. 1928.

SOUTHWIRE. **Product Catalog**: Aluminum Conductor Steel Reinforced bare (ACSR). Disponível em: <<http://www.southwire.com/products/ACSR.htm>>. Acesso em: 9 jun. 2015.

SRINIVASAN, K.; ST-JACQUES, A. A New Fault Location Algorithm for Radial Transmission Lines with Loads. **IEEE Power Engineering Review**, [Piscataway], v.9, n.7, p.52-52, July. 1989.

STOUPIS, J. et al. **Reliable Detection of High-Impedance Faults Caused by Downed Conductors**. 2004. ABB Review. Disponível em: https://library.e.abb.com/public/b0a2eef7ff6d957ac1256e3f004d5c8d/28-31_M843.pdf. Acesso em: 6 abr. 2013.

STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. Fault Location Methods for Overhead Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, [Piscataway], v.76, n.3, p. 518-529, Apr. 1957.

SULTAN, A. F.; FEDIRCHUK, D. J.; SWIFT, G. W. Detecting Arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.9, n.1, p.461-470, Jan.1994.

SWIFT, G. The Spectra of Fault-Induced Transients. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [Piscataway], v.98, n 3, p.940-947, May 1979.

TAKAGI, T. et al. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I - Fourier Transformation Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [Piscataway], v. 100, n.3, p.1316-1323, Mar. 1981.

TAKAGI, T. et al. Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [Piscataway], v.101, n.8, p.2892-2898, Aug. 1982.

URIARTE, F. M. **Modeling, Detection, And Localization of High-Impedance Faults In Low-Voltage Distribution Feeders**. 2003. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculty Of The Virginia Tech Polytechnic Institute And State University, Virginia, 2003.

WAI, D. C. T.; YIBIN, X. A novel technique for high impedance fault identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.13, n.3, p.738-744, July. 1998.

WATSON, N.; ARRILLAGA, J. **Power Systems Electromagnetic Transients Simulation**. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2003.

ZAMANAN, N ; SYKULSKI, J. . The evolution of high impedance fault modeling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 16., 2014, Bucharest. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2014. p.77-81.

ZAMANAN, N.; SYKULSKI, J. K. . Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in the electric arc. In: WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING

ACADEMY AND SOCIETY INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS, 6., 2006, Lisboa. **Proceedings...** [s.l.]: WEAS, 2006. p.28-33.

ZANETTA, L. C. J. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: USP, 2003.

ZHOU, J. et al. Locating short-circuit faults in underground networks. In: INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, 45., 2011, Orlando. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2011. p.1-7.

ZHOU, J. et al. High-performance arcing-fault location in distribution networks. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [Piscataway], v.48, n.3, p.1107-1114, May 2012.

ZHU J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.12, n.2, p.801-809, Apr. 1997.

ZIEGEL, E. et al. **Numerical Recipes: the art of scientific computing**. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

APÊNDICE A: ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS LINEARES

Considerando um sistema linear, sobre o qual é possível realizar certas medições, é possível realizar representações matemáticas do mesmo segundo a seguinte relação matricial:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} \quad (\text{A.1})$$

onde

- \mathbf{y} : é um vetor de tamanho $N \times 1$, constituído por medições ou dados conhecidos;
- \mathbf{X} : é uma matriz de tamanho $N \times R$, constituído por medições ou dados conhecidos;
- $\boldsymbol{\theta}$: é um vetor de tamanho $R \times 1$, constituído por certos parâmetros θ_j que explicam \mathbf{y} em função de \mathbf{X} .

No contexto explicado no parágrafo anterior, considera-se o problema em que os parâmetros θ_j , que explicam \mathbf{y} em função de \mathbf{X} , são desconhecidos. Visando encontrar uma forma de estimar os parâmetros do modelo linear descrito pela equação (A.1), considera-se a possibilidade de cometer um erro

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\xi} \quad (\text{A.2})$$

Onde

- $\hat{\boldsymbol{\theta}}$: é o vetor de parâmetros estimados, os quais podem ser diferentes aos parâmetros reais descritos por $\boldsymbol{\theta}$;
- $\boldsymbol{\xi}$: é o vetor de resíduos, de tamanho $N \times 1$, que constitui o erro cometido ao tentar explicar \mathbf{y} mediante os parâmetros estimados.

A fim de encontrar uma solução que tenha algum significado, é interessante que os parâmetros estimados fossem tais que reduzissem o resíduo de alguma forma. De acordo com (AGUIRRE, 2007), para tornar a resposta mais precisa, define-se a norma quadrática do resíduo em função dos parâmetros do modelo conforme:

$$J_{\boldsymbol{\theta}} = \sum_{i=1}^N \xi(i)^2 = \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\xi} = \|\boldsymbol{\xi}\|^2, \quad (\text{A.3})$$

que nada mais é do que um índice que quantifica a qualidade de ajuste de $\mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}}$ ao vetor de dados \mathbf{y} . Portanto, seria interessante que os parâmetros estimados minimizassem $J_{\boldsymbol{\theta}}$.

Considerando (A.2), a expressão (A.3) pode ser reescrita como:

$$J_{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}} - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (\text{A.4})$$

que, segundo a expressão (A.3), pode ser reescrita conforme:

A fim de minimizar a função de custo J_{θ} , primeiramente é necessário calcular a sua derivada em função dos parâmetros do modelo:

$$\frac{\partial J_{\theta}}{\partial \hat{\theta}_j} = -(\mathbf{y}^T \mathbf{X})^T - \mathbf{X}^T \mathbf{y} + (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{X}) \hat{\boldsymbol{\theta}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (\text{A.5})$$

Igualando a expressão (A.5) a zero, resulta que:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (\text{A.6})$$

Finalmente, dado que a função a ser minimizada é convexa, o valor que minimiza a somatória dos erros quadráticos é obtido a partir da aplicação das condições de 1ª ordem de otimalidade, ou seja, para que os parâmetros estimados minimizem J_{θ} , é necessário que:

$$\frac{\partial^2 J_{\theta}}{\partial \hat{\theta}_j^2} = 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{0} > 0. \quad (\text{A.7})$$

Segundo (AGUIRRE, 2007), a expressão (A.7) é, de fato, verdadeira, pois $2\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ é positiva definida por construção. Portanto, a expressão (A.6) é o estimador que fornece o valor de $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ que minimiza o somatório do quadrado dos erros.

Em algumas situações práticas poderá ser desejado dar pesos diferentes para certos valores de erro. Por exemplo, pode ocorrer que por um determinado período de tempo o grau de incerteza das medições seja maior e se deseje dar um peso menor aos erros cometidos nesse período. Por este motivo, a equação (A.3) pode ser reescrita como

$$J_{\theta} = \sum_{i=1}^N \xi(i) w_i \xi(i) = \boldsymbol{\xi}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\xi}, \quad (\text{A.8})$$

Sendo que $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ é uma matriz diagonal cujos elementos são os pesos w_i , ou seja, $\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_N)$. Seguindo um processo semelhante ao seguido na obtenção da equação (A.6), chega-se à solução por mínimos quadrados ponderados:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{y}. \quad (\text{A.9})$$

APÊNDICE B: ALGORITMO PARA ESTIMAÇÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES

A teoria exposta em (ZIEGEL et al., 2007) permite desenvolver um algoritmo para resolver problemas de mínimos quadrados mediante a SVD. Tal algoritmo funciona realiza os seguintes procedimentos:

- a) aplicar a SVD à matriz de regressores do problema;
- b) zerar os valores singulares (σ_j) menores a um determinado limiar (escolhido de maneira arbitrária);
- c) realizar a pseudoinversa e para obter a solução intermediária;
- d) transformar a solução intermediária na solução final do problema.

O algoritmo escrito na linguagem Matlab e apresentado na forma de função no Quadro C.1.

Quadro C.1 - Algoritmo para estimação por mínimos quadrados utilizando o método de decomposição em valores singulares em linguagem Matlab.

```
function Xe=LSE_SVD(y,A,lim,W)
%Função para resolver o problema LSE com SVD
%y = vetor y
%A = regressores
%lim = limiar para desconsiderar valores singulares muito pequenos
%(normalmente usa-se 0)
%W = matriz de pesos, dimensão = m x m, onde: m=length(y);

if nargin==2
    lim=0;
    m=length(y);
    W=eye(m,m);
elseif nargin==3
    m=length(y);
    W=eye(m,m);
end

yp=W*y; Ap=W*A;
[Up,Sp,Vp] = svd(Ap);
r = length(find(diag(Sp)>lim)); %desconsidera se o valor singular é menor do que 'lim'
Uhat = Up(:,1:r);
Shat = Sp(1:r,1:r);
z = Shat\ (Uhat'*yp);
Xe = Vp*[z;zeros(size(Ap,2)-r,1)];

end
```


APÊNDICE C: IDENTIDADES PARA O CÁLCULO DO GRADIENTE E DA MATRIZ HESSIANA

Assumindo que \mathbf{A} é uma matriz quadrada de dimensão $R \times R$ e $\boldsymbol{\theta}$ e \mathbf{x} são vetores $R \times 1$, são consideradas as funções que realizam o mapeio $\mathbb{R}^R \mapsto \mathbb{R}$ constituídas por \mathbf{A} , $\boldsymbol{\theta}$ e \mathbf{x} , cujas variáveis independentes são as componentes do vetor $\boldsymbol{\theta}$. Neste contexto, é possível definir as seguintes identidades para o cálculo do gradiente de algumas funções particulares:

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{x}) = \nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{x}^T \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{x}, \quad (\text{D.1})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \cdot^2 \mathbf{x}) = \nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{x}^T \boldsymbol{\theta} \cdot^2) = 2\text{diag}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{x}, \quad (\text{D.2})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}) = (\mathbf{A} + \mathbf{A}^T) \boldsymbol{\theta}, \quad (\text{D.3})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \cdot^2 \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} \cdot^2) = 2\text{diag}(\boldsymbol{\theta})(\mathbf{A} + \mathbf{A}^T) \boldsymbol{\theta} \cdot^2, \quad (\text{D.4})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} \cdot^2) = [2\text{diag}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{A}^T + \mathbf{A} \text{diag}(\boldsymbol{\theta})] \boldsymbol{\theta}, \quad (\text{D.5})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \cdot^2 \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}) = [2\text{diag}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \text{diag}(\boldsymbol{\theta})] \boldsymbol{\theta}. \quad (\text{D.6})$$

Quando a matriz \mathbf{A} é simétrica, as expressões (D.3) a (D.6) podem ser simplificadas da seguinte maneira:

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}) = 2\mathbf{A} \boldsymbol{\theta}, \quad (\text{D.7})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \cdot^2 \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} \cdot^2) = 4\text{diag}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} \cdot^2, \quad (\text{D.8})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} \cdot^2) = \nabla_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^T \cdot^2 \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}) = [2\text{diag}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{A} + \mathbf{A} \text{diag}(\boldsymbol{\theta})] \boldsymbol{\theta}. \quad (\text{D.9})$$

A função $\text{diag}(\boldsymbol{\theta})$ entrega uma matriz quadrada e diagonal, com os elementos do vetor $\boldsymbol{\theta}$ na diagonal principal, como por exemplo:

$$\text{diag} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{D.10})$$

Considerando uma função que realiza o mapeio $\mathbb{R}^R \mapsto \mathbb{R}$, a matriz Hessiana é uma matriz quadrada de dimensão $R \times R$, constituída pelas derivadas parciais de segunda ordem da função em questão. Esta matriz serve para avaliar a variação do gradiente da função em relação às variáveis consideradas nesta função. A matriz Hessiana é amplamente utilizada para implementar métodos de otimização matemática, como por exemplo, o método de Newton (LUENBERGER; YE, 2008). Visando exemplificar, considere uma função de duas variáveis

$f(u, v)$. Neste sentido, a matriz Hessiana associada a uma função deste tipo pode ser escrita como:

$$\nabla^2 f = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial u \partial v} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial v \partial u} & \frac{\partial^2 f}{\partial v^2} \end{bmatrix} \quad (\text{D.11})$$

Outra forma de obter a matriz Hessiana é mediante a derivação de um gradiente. Neste contexto, é possível deduzir as seguintes identidades que resultam na matriz Hessiana a partir da derivada de gradientes:

$$D_{\theta} [\text{diag}(\theta) \mathbf{x}] = \text{diag}(\mathbf{x}), \quad (\text{D.12})$$

$$D_{\theta} (\mathbf{A}\theta) = \mathbf{A}, \quad (\text{D.13})$$

$$D_{\theta} (\mathbf{A}\theta.^2) = D_{\theta} [\mathbf{A} \text{diag}(\theta) \theta] = 2\mathbf{A} \text{diag}(\theta), \quad (\text{D.14})$$

$$D_{\theta} [\text{diag}(\theta) \mathbf{A}\theta] = \text{diag}(\theta) + \sum_{j=1}^R \text{diag}(\mathbf{A}_{\cdot j}) \text{diag}_R(\theta_j), \quad (\text{D.15})$$

$$D_{\theta} [\mathbf{A} \text{diag}(\theta) \theta] = 2\text{diag}(\theta) \mathbf{A} \text{diag}(\theta) + \sum_{j=1}^R \text{diag}(\mathbf{A}_{\cdot j}) \text{diag}_R(\theta_j^2). \quad (\text{D.16})$$

Em correspondência com a notação utilizada por Golub e Van Loan (2013), nas equações (D.15) e (D.16) é adotado o seguinte:

- θ_j : é o elemento j do vetor θ ;
- $\mathbf{A}_{\cdot j}$: é um vetor constituído por todas as linhas de \mathbf{A} correspondentes à coluna j ;

A função $\text{diag}_R(\theta)$ constrói uma matriz quadrada e diagonal, com o escalar θ alocado em todos os lugares da diagonal principal. Como exemplo considere o caso apresentado na equação (D.16), considerando $R = 3$:

$$\text{diag}_3(\theta_j^2) = \begin{bmatrix} \theta_j^2 & 0 & 0 \\ 0 & \theta_j^2 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_j^2 \end{bmatrix}. \quad (\text{D.17})$$

Para aplicar as identidades anteriores ao problema da LDFAI e estimação dos parâmetros da FAI, considerando a capacitância da linha de transmissão, é importante entender que as matrizes $[\mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_L]$, $[\mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_Q]$ e $[\mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_Q]$ na equação (5.61) são simétricas por construção e que:

$$\mathbf{X}_Q^T \mathbf{X}_L = (\mathbf{X}_L^T \mathbf{X}_Q)^T \quad (\text{D.18})$$

APÊNDICE D: MODELAGEM DE UM INDUTOR VIA MODELS

Para evitar as oscilações numéricas inerentes do método de integração trapezoidal (padrão do ATP), o indutor correspondente ao modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990) foi modelado mediante o método de integração numérica de Gear de segunda ordem (WATSON; ARRILLAGA, 2003). A implementação do indutor dentro do ATP foi realizada mediante um bloco MODELS *Norton Type-94* (DUBÉ, 1996) e cujo código é exibido no Quadro E.1.

Quadro E.1 - Algoritmo para implementação de um indutor segundo o método de segunda ordem de Gear em linguagem MODELS

```

DATA n -- number of phases
      ng {df1t: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side

INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
        v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
        i0[1..n] -- current(t=0) into each left node

VAR i[1..n] -- current(t) into each left node (for plotting)
      is[1..n] -- Norton source(t+timestep) at each left node
      g[1..ng] -- conductance(t+timestep) at each left node
          -- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
      flag -- set to 1 whenever conductance value is modified

OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag

comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular model |
| - their value is defined at the time of using the type-94 component |
-----endcomment
-- End header.

DATA L1 --[H] Indutância

comment-----
| Next, declarations provate to this model |
-----endcomment

VAR st --utilizado para converter de Laplace (s) para o dom. do tempo
      L --[H] valor variável da indutância

INIT
st := 3/(2*timestep) --Para converter desde Laplace usando a regra Gear2
L := L1 --Valor inicial da indutância
g := 1/(st*L) --Valor inicial da condutância
ENDINIT

EXEC
IF t=0 THEN
flag := 1 --O valor da condutância mudou
i := i0 --Corrente a través de L quando t=0
is := -((4/3)*i0-(1/3)*0) --Termo histórico para o seguinte passo de tempo
ELSE
flag := 0 --Reset flag
i := g*v-is --Aplicando a regra Gear2, calculada desde v(t)
is := -((4/3)*i-(1/3)*prevval(i)) --Termo histórico para o seguinte passo de tempo
ENDIF
ENDEXEC

ENDMODEL

```


APÊNDICE E: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE 13 BARRAS DA IEEE MODIFICADO

Este apêndice apresenta em detalhes o sistema modificado de 13 barras da IEEE utilizado nas simulações e estudos de caso apresentados no Capítulo 7. Os dados que serão apresentados estarão baseados no diagrama apresentado na Figura F.1.

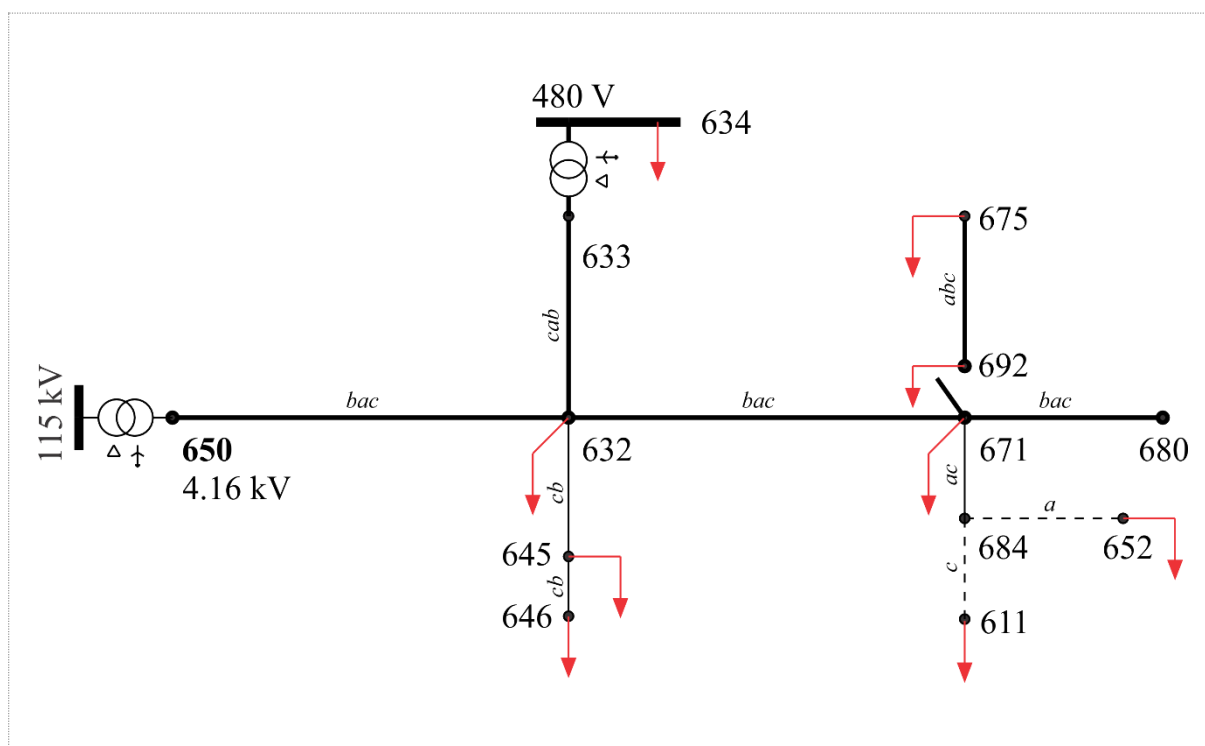


Figura F.1 - Diagrama do sistema de potência usado nas simulações: IEEE de 13 barras.
Fonte: O autor (2016).

E.1 CONFIGURAÇÕES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo o apresentado em (KERSTING, 2001), os parâmetros dos condutores utilizados são os indicados pelo fabricante *Southwire* (SOUTHWIRE, 2015) e cujos valores são expostos na Tabela F.1.

Tabela F.1 - Condutores utilizados no sistema IEEE de 13 barras.

Código	Bitola AWG ou kcmil	Formação (Al/Aço)	Diâmetros [cm]			Condutor completo	Resistência [Ω /km]		Capacidade [A]
			Individual		Núcleo de Aço		DC 20 $^{\circ}$ C	AC 75 $^{\circ}$ C	
			Alumínio	Aço					
Dove	556,5	26/7	0,3716	0,289	0,8669	2,354	0,10039	0,1230	726
Penguin	4/0	6/1	0,4617	0,4617	0,4617	1,43002	0,2608	0,3904	357
Raven	1/0	6/1	0,337	0,337	0,337	1,0109	0,5216	0,7119	242

O sistema de potência original apresentado em (KERSTING, 2001), possui duas linhas subterrâneas cujas configurações são indicadas com os números 606 e 607. Tais configurações foram substituídas por linhas aéreas sem neutro, cujas configurações são denominadas com os números 500, 505 e 510, como apresentadas na Figura F.2.

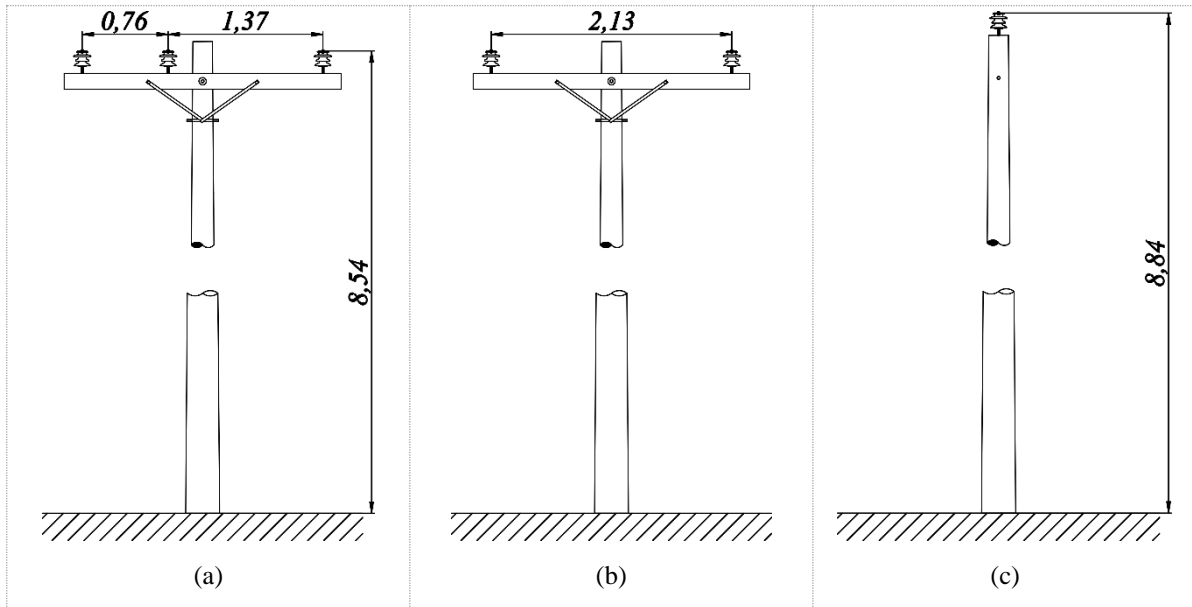


Figura F.2 - Configurações modificadas das linhas do sistema de 13 barras da IEEE: (a) configuração 500; (b) configuração 505; (c) configuração 510.
Fonte: O autor (2016).

Para cada combinação utilizada entre a configuração da Figura F.2 combinada com um condutor da Tabela F.1, foi assignada um código, como apresentado na Tabela F.2.

Tabela F.2 - Código para a combinação entre configuração de linha e condutor.

Código	Condutores de fase	Configuração
IEEE_3_1	556,5 26/7	500
IEEE_3_2	4/0 6/1	500
IEEE_2_3	1/0	505
IEEE_1_3	1/0	510

Combinando as configurações de linhas com os condutores das fases, é possível calcular matrizes de impedância série (Z) e admitância em paralelo (Y), que correspondem a um modelo π de parâmetros concentrados para a frequência de 60 Hz. Tais matrizes são listadas a seguir:

a) código IEEE_3_1:

$$Z = \begin{bmatrix} 0,159 + j0,86 & 0,058 + j0,531 & 0,058 + j0,453 \\ 0,058 + j0,531 & 0,159 + j0,86 & 0,058 + j0,486 \\ 0,058 + j0,453 & 0,058 + j0,486 & 0,159 + j0,86 \end{bmatrix} \Omega/km \quad (F.1)$$

$$Y = j \begin{bmatrix} 3,622 & -1,35 & -0,571 \\ -1,35 & 3,779 & -0,924 \\ -0,571 & -0,924 & 3,365 \end{bmatrix} \mu S/km \quad (F.2)$$

b) código IEEE_3_2:

$$Z = \begin{bmatrix} 0,319 + j0,898 & 0,058 + j0,531 & 0,058 + j0,453 \\ 0,058 + j0,531 & 0,319 + j0,898 & 0,058 + j0,486 \\ 0,058 + j0,453 & 0,058 + j0,486 & 0,319 + j0,898 \end{bmatrix} \Omega/km \quad (F.3)$$

$$Y = j \begin{bmatrix} 3,295 & -1,153 & -0,511 \\ -1,153 & 3,418 & -0,800 \\ -0,511 & -0,800 & 3,093 \end{bmatrix} \mu S/km \quad (F.4)$$

c) código IEEE_2_3:

$$Z_4 = \begin{bmatrix} 0,580 + j0,924 & 0,058 + j0,453 \\ 0,058 + j0,453 & 0,580 + j0,924 \end{bmatrix} \Omega/km \quad (F.5)$$

$$Y_4 = j \begin{bmatrix} 2,764 & -0,711 \\ -0,711 & 2,764 \end{bmatrix} \mu S/km \quad (F.6)$$

d) código IEEE_2_3:

$$Z_6 = [0,58 + j0,924] \Omega/km \quad (F.7)$$

$$Y_6 = j[2,57] \mu S/km \quad (F.8)$$

A Tabela F.3 apresenta o comprimento, código e sequência de fases das conexões existentes entre cada nó do sistema de potência simulado.

Tabela F.3 - Conexões entre os nós do sistema de 13 barras da IEEE modificado.

Nó <i>i</i>	Nó <i>j</i>	Comprimento [m]	Código do conector	Sequência de fases
632	645	152,4	IEEE_2_3	<i>cb</i>
632	633	152,4	IEEE_3_2	<i>cab</i>
633	634	0	T2	<i>abc</i>
645	646	91,44	IEEE_2_3	<i>cb</i>
650	632	609,6	IEEE_3_1	<i>bac</i>
684	652	243,84	IEEE_1_3	<i>a</i>
632	671	609,6	IEEE_3_1	<i>bac</i>
671	684	91,44	IEEE_2_3	<i>ac</i>
671	680	304,8	IEEE_3_1	<i>bac</i>
671	692	0	S1	<i>abc</i>
684	611	91,44	IEEE_1_3	<i>c</i>
692	675	152,4	IEEE_3_2	<i>abc</i>
6500	650	0	T1	<i>abc</i>

T1 e T2: transformadores;
S1: interruptor trifásico.

E.2 CARREGAMENTO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

A Tabela F.4 apresenta as cargas por fases conectadas em cada nó do sistema de potência simulado.

Tabela F.4 - Cargas conectadas no sistema de 13 barras da IEEE modificado

Nó	Tensão [V]	S ₁		S ₂		S ₃		Sequência de Fases	Conexão
		P ₁ [kW]	Q ₁ [kVAR]	P ₂ [kW]	Q ₂ [kVAR]	P ₃ [kW]	Q ₃ [kVAR]		
634	480	160	110	120	90	120	90	<i>abc</i>	D
645	4160	0	0	170	125	0	0	<i>b</i>	YN
646	4160	0	0	230	132	0	0	<i>b</i>	YN
652	4160	128	86	0	0	0	0	<i>a</i>	YN
671	4160	385	220	385	220	385	220	<i>abc</i>	D
675	4160	485	190	68	60	290	212	<i>abc</i>	D
692	4160	0	0	0	0	170	151	<i>c</i>	YN
611	4160	0	0	0	0	170	80	<i>c</i>	YN
632	4160	8,5	5	33	19	58,5	34	<i>abc</i>	D
671	4160	8,5	5	33	19	58,5	34	<i>abc</i>	D

D: conexão delta;

YN: conexão estrela com neutro aterrado.

Todas as cargas foram modeladas como impedâncias constantes em função das potências e tensões expostas na Tabela F.4. Para calcular o valor das impedâncias conectadas entre cada fase, correspondentes a cada nó, as seguintes considerações foram realizadas:

- Para cargas em Delta:
 - a) as tensões de linha são balanceadas, constantes e iguais aos valores nominais;
 - b) as potências apresentadas na Tabela D.4 correspondem as impedâncias conectadas entre fases, deste modo, a potência S₁ corresponde à impedância entre as fases *a* e *b*, a potência S₂ corresponde à impedância entre as fases *b* e *c* e a potência S₃ corresponde à impedância entre as fases *c* e *a*.
- Para cargas em Estrela
 - a) As tensões de fase são consideradas balanceadas, constantes e iguais aos valores nominais;
 - b) as potências apresentadas na Tabela D.4 correspondem as impedâncias conectadas entre cada fase e o neutro da estrela, deste modo, a potência S₁ corresponde à impedância da fase *a*, a potência S₂ corresponde à impedância da fase *b* e a potência S₃ corresponde à impedância da fase *c*.

Os valores das impedâncias que foram utilizadas se mostram na Tabela F.5.

Tabela F.5 - Valores da resistência e reatância indutiva conectada entre cada fase de cada nó do sistema de 13 barras da IEEE modificado

Nó <i>i</i>	Nó <i>j</i>	R [Ω]	XL [Ω] (60 Hz)
634/a	634/b	0,9778	0,6722
634/b	634/c	1,2288	0,9216
634/c	634/a	1,2288	0,9216
645/b	Terra	22,024	16,194
646/b	Terra	18,866	10,827
652/a	Terra	31,054	20,861
671/c	671/b	33,885	19,362
671/a	671/c	33,885	19,632
671/c	671/a	33,885	19,632
675/a	675/b	30,934	12,118
675/b	675/c	143,09	126,25
675/c	675/a	38,89	28,43
692/c	Terra	18,967	16,847
611/c	Terra	27,78	13,073
632/a	632/b	1512,57	889,748
632/b	632/c	393,85	226,763
632/c	632/a	221,12	128,518
671/a	671/b	1512,57	889,748
671/b	671/c	393,85	226,763
671/c	671/a	221,12	128,518

E.3 DADOS DOS TRANSFORMADORES

Em relação ao sistema de potência original apresentado por Kersting (2001), o regulador de tensão instalado na subestação de distribuição foi substituído por um transformador com características equivalentes. Os dados gerais dos dois transformadores modelados no sistema de 13 barras da IEEE modificado se mostram na Tabela D.6. Os parâmetros específicos para a modelagem dos transformadores no ATP, utilizando o modelo geral de transformador saturável se expõem nas Tabelas F.7 e F.8.

Tabela F.6 - Dados gerais dos transformadores.

	Potência [kVA]	Tensão de alta [kV]	Tensão de baixa [kV]	R - %	X - %
Subestação (T1)	5.000	115 - D	4,16 Gr. Y	1	8
Distribuição (T2)	500	4,16 - Gr.W	0,48 - Gr.W	1,1	2

Tabela F.7 - Parâmetros para modelagem numérica no ATP: transformador da subestação de distribuição (T1).

	Primário	Secundário
U [V]	115.000	2.401,77
R [ohm]	13,225	0,005768
XL [ohm]	105,08	0,04615
Conexão	D	Y
Desfasagem		30°

Tabela F.8 - Parâmetros para modelagem numérica no ATP: transformador de distribuição (T2).

	Primário	Secundário
U [V]	2.401,77	277,128
R [ohm]	0,19036	0,002534
XL [ohm]	0,3461	0,004608
Conexão	Y	Y
Desfasagem		0°

APÊNDICE F: DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Para realizar este trabalho foi necessário realizar uma grande quantidade de simulações, tornando inviável a execução manual das mesmas mediante o programa ATP. Por este motivo, o Matlab foi utilizado para desenvolver um algoritmo dedicado a escrever os arquivos *.atp¹⁹, e executar as simulações. Como a técnica proposta para LDFAI foi implementada no Matlab, também foi necessário converter de forma automática os resultados das simulações do formato *.pl4²⁰ ao formato *.mat²¹. Uma vez que a conversão de formatos é feita, uma série de passos básicos devem ser realizados pelo programa e são detalhados a seguir:

- gerar um objeto²² a partir do arquivo *.mat resultante, cujos atributos são os sinais de tensão e corrente. Estes dados são necessários para identificar o sistema simulado e dados do evento simulado (por exemplo, os valores dos parâmetros da FAI e a distância em que esta se encontra);
- amostrar os sinais de cada objeto, segundo uma taxa de amostragem especificada, e armazenar os objetos amostrados em uma estrutura de pastas que facilitem sua identificação;

Depois de gerar e armazenar os objetos referidos acima, a técnica de LDFAI é aplicada seguindo os seguintes passos gerais:

- realizar a leitura dos resultados das simulações previamente amostrados, organizados e armazenados na forma de objetos;
- ordenar os sinais de tensão e corrente segundo as denominações adotadas no ATP;
- executar o algoritmo de LDFAI baseado no MQL ou Newton;
- armazenar os resultados da LDFAI em uma localização específica na forma de objetos;
- resumir os resultados em matrizes e converte-las para o formato *.xlsx.

Os arquivos *.xlsx são finalmente processados no MS-Excel, gerando tabelas e figuras que permitam analisar o desempenho da técnica proposta para LDFAI.

Visando resolver a equação (5.40) foram implementados dois algoritmos: o primeiro não considera a capacitância da linha de transmissão e o segundo considera esta capacitância.

¹⁹ O cartão de entrada para simular um caso no ATP é armazenado no formato *.atp, também é utilizado o *.dat.

²⁰ Os resultados das simulações provenientes do ATP são armazenadas no formato *.pl4.

²¹ O Matlab utiliza o formato *.mat para armazenar um *workspace*, contendo qualquer tipo de objeto suportado pelo programa.

²² O conceito de objeto é utilizado para armazenar, em uma única entidade, sinais, parâmetros e funções.

O primeiro algoritmo será denominado como Algoritmo de Mínimos Quadrados Linear (AMQL) e o segundo como Algoritmo de Mínimos Quadrados Não Linear (AMQNL).