

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

RENATO GONÇALVES FERRAZ

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA:  
FORMULAÇÃO BASEADA NA IMPEDÂNCIA APARENTE E  
NO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS**

Porto Alegre

2014



RENATO GONÇALVES FERRAZ

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA:  
FORMULAÇÃO BASEADA NA IMPEDÂNCIA APARENTE E  
NO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS**

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

2014



## CIP - Catalogação na Publicação

Gonçalves Ferraz, Renato

Localização de Faltas de Alta Impedância: formulação baseada na impedância aparente e no método de mínimos quadrados / Renato Gonçalves Ferraz. -- 2014.  
73 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, 2014.

1. Falta de alta impedância. 2. Localização de faltas. 3. Método baseado na impedância aparente. 4. Método de mínimos quadrados. I. Suman Bretas, Arturo, orient. II. Título.



**RENATO GONÇALVES FERRAZ**

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA:  
FORMULAÇÃO BASEADA NA IMPEDÂNCIA APARENTE E  
NO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS**

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. Damásio Fernandes Júnior, UFCG  
Doutor pela Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, Brasil

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

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jacqueline Gisèle Rolim, UFSC  
Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

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

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UFRGS  
Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Coordenador do PPGE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Outubro de 2014.





## AGRADECIMENTOS

Ao meu país, em reconhecimento a todos os cidadãos brasileiros que contribuem para a manutenção do ensino superior público, como fator de desenvolvimento científico e tecnológico, apesar de todas as desigualdades sociais e econômicas.

À minha família, especialmente minha mãe e meu irmão Gilmar Ferraz, pela torcida incondicional ao longo da minha vida.

Ao Prof. Arturo Suman Bretas, pela confiança em mim depositada, pelas oportunidades que me foram dadas e pelos ótimos anos de trabalho e convivência que tivemos juntos.

Às pessoas que contribuíram diretamente no desenvolvimento deste trabalho, em especial à Bibiana Maitê Petry, pelo sincero e incondicional companheirismo ao longo desses últimos meses. Ao amigo Leonardo Ulises Iurinic, por toda ajuda prestada, pelos trabalhos que realizamos juntos e pela sincera amizade.

Aos colegas e professores do LASEP, pelas oportunidades de trabalhos conjuntos, conversas, piqueniques...: Roberto Chouhy Leborgne, Bibiana Maitê Petry, Juliana Klas, Leonardo Ulises Iurinic, Daniel da Silva Gazzana, Aquiles Rossoni, André Michel, Roberto José Cabral e Martín Cruz Rodríguez Paz.

Aos professores do PPGEE, por toda dedicação para elevar o nível de excelência deste programa e à Miriam Adriana de Oliveira Rosek pela importância do trabalho realizado junto ao PPGEE.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) pelo suporte financeiro.



*Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.*

Cora Coralina (1983)



## RESUMO

As linhas de transmissão são usadas para transmitir energia elétrica por longas distâncias e estão naturalmente expostas a condições climáticas severas e à ocorrência de faltas, especialmente as linhas aéreas. Estatísticas mostram que entre 70% - 90% das faltas em linhas de transmissão aéreas são momentâneas (ou transitórias) e apresentam formação de arco elétrico. O arco elétrico é a principal característica de uma falta de alta impedância e resulta do pobre contato entre um condutor energizado e a superfície envolvida. Esta tese aborda o problema de localização de faltas de alta impedância em linhas de transmissão curtas. Propõe-se uma nova técnica de localização de faltas de alta impedância baseada na impedância aparente, desenvolvida no domínio da frequência e que utiliza componentes de fase. A estimativa da distância da falta é obtida a partir da solução de um sistema sobredeterminado de equações lineares, obtida pela aplicação do método de mínimos quadrados. A abordagem proposta permite estimar a distância de faltas de alta impedância momentâneas e permanentes, em linhas de transmissão curtas simples e paralelas, transpostas ou não. O desempenho da técnica de localização de faltas proposta é avaliado mediante estudos de casos simulados no *Alternative Transients Program (ATP)* considerando análises de sensibilidade e comparativa, bem como casos reais de faltas. Os resultados obtidos, considerando faltas de alta impedância simuladas e reais, indicam claramente que a abordagem proposta possui validade como técnica de localização de faltas em linhas de transmissão curtas em decorrência do desempenho demonstrado e, também, por características tais como: formulação simplificada no domínio da frequência, simplicidade e facilidade de implementação em dispositivos reais e aplicabilidade a casos reais.

**Palavras-chave:** Falta de alta impedância. Localização de faltas. Método baseado na impedância aparente. Método de mínimos quadrados.



## ABSTRACT

Transmission lines are used to transmit electric power over long distances and are naturally exposed to severe weather conditions, especially overhead lines. Such conditions are highly favorable to the occurrence of faults. Statistics show that between 70% - 90% of faults on overhead lines are nonpermanent (or transient), and present arcing. Arcing is the main characteristic of a nonlinear high impedance fault and is the result of poor contact between an energized conductor and the ground or a grounded object. This thesis approaches the high impedance fault location on short transmission lines problem. It is proposed an impedance-based nonlinear high impedance fault location formulation developed in frequency domain and phase components. The formulation uses the least square method and synchronized phasors, measured by, for example, digital fault recorders installed at both line terminals. The proposed approach allows to estimate the distance of high impedance momentary and permanent faults on short transposed or untransposed transmission lines. The performance of the proposed fault location approach is evaluated through analysis of simulated cases in the Alternative Transients Program (ATP) considering sensitivity and comparative analyzes, and actual cases of high impedance faults. The results, considering simulations of high impedance faults and actual cases, indicate clearly that the proposed approach is valid as fault location technique in short transmission lines due to the demonstrated performance.

**Keywords: Fault location. High impedance fault. Impedance-based method. Least square method.**





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Linha de transmissão sob falta.....	38
Figura 2.2 - Curva característica da tensão em função da corrente de uma FAI.....	40
Figura 2.3 - Curva da corrente em função do tempo de uma FAI típica.....	40
Figura 2.4 - Modelo de FAI baseado em diodos em antiparalelo com resistência constante...	41
Figura 2.5 - Curvas de correntes de faltas: (a) caso particular de uma FAI; (b) falta puramente resistiva.....	42
Figura 2.6 - Modelo de FAI baseado no controle por TACS.....	43
Figura 2.7 - Modelo de FAI em diodos em antiparalelo com resistência variável.....	44
Figura 2.8 - Correntes de FAI: (a) FAI real; (b) modelo de FAI que utiliza resistência constante; (c) modelo de FAI que emprega resistência variável no tempo; (d) curva da $R_F(t)$ definida na Tabela 2.1.....	45
Figura 2.9 - Curvas das resistências de falta em função do tempo: (a) solo local; (b) areia.....	46
Figura 2.10 - Curvas das correntes de FAI obtidas a partir da função polinomial: (a) solo local; (b) árvore; (c) areia; (d) asfalto; (e) grama.....	47
Figura 2.11 - Classificação dos métodos de localização de faltas em sistemas elétricos de potência.....	48
Figura 2.12 - Ondas viajantes geradas por uma falta em uma linha de transmissão.....	49
Figura 2.13 - LTEE monofásica sob falta com dados medidos no terminal local.....	50
Figura 3.1 - Linha do tempo da revisão bibliográfica de LDFAI em linhas de transmissão....	54
Figura 3.2 - Segmento de uma linha de transmissão sob falta com arco elétrico.....	55
Figura 3.3 - Componentes de sequências do segmento de linha da Figura 3.2.....	55
Figura 3.4 - Diagrama de sequências de segmento de uma linha de transmissão sob falta.....	60
Figura 3.5 - Modelo de falta com arco elétrico.....	63
Figura 3.6 - Segmento de uma linha de transmissão sob falta fase-terra com arco elétrico....	64
Figura 3.7 - Componentes de sequências do segmento de linha da Figura 3.6.....	65
Figura 3.8 - Linha de transmissão sob falta.....	67
Figura 3.9 - Diagramas de sequências do sistema da Figura 3.8.....	68
Figura 3.10 - Diagrama de uma linha monofásica com parâmetros distribuídos.....	69
Figura 4.1 - Linha de transmissão monofásica sob falta.....	76
Figura 4.2 - Representação gráfica dos consecutivos fasores estimados.....	78
Figura 4.3 - Forma de onda de corrente de uma FAI momentânea.....	81
Figura 4.4 - Forma de onda de corrente de uma FAI permanente.....	81
Figura 4.5 - Linha de transmissão trifásica simples sob falta.....	82
Figura 4.6 - Linha de transmissão trifásica dupla sob falta na linha 1.....	87
Figura 4.7 - Segmento de uma linha de transmissão trifásica paralela.....	88

Figura 4.8 - Erros relativos considerando consecutivas estimativas da distância de falta em 1 ciclo.....	94
Figura 4.9 - Erros relativos considerando consecutivas estimativas da distância de falta em 28 ciclos. ....	94
Figura 4.10 - Diagrama de blocos simplificado das etapas para estimar a distância da falta. .	95
Figura 4.11 - Fluxograma do algoritmo de LDFAI proposto para linhas de transmissão simples. ....	96
Figura 5.1 - Diagrama do sistema de potência usado nas simulações. ....	99
Figura 5.2 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo $\theta$ - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	105
Figura 5.3 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões $V_n$ e $V_p$ - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ..	106
Figura 5.4 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	107
Figura 5.5 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	107
Figura 5.6 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	108
Figura 5.7 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	108
Figura 5.8 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	109
Figura 5.9 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	109
Figura 5.10 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo $\theta$ - FAI FFT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	110
Figura 5.11 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões $V_n$ e $V_p$ - FAI FT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	111
Figura 5.12 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	111
Figura 5.13 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	112
Figura 5.14 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	113

Figura 5.15 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	113
Figura 5.16 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	114
Figura 5.17 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FT- <i>ab</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente..	114
Figura 5.18 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo $\theta$ - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	115
Figura 5.19 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões $V_n$ e $V_p$ - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente...	116
Figura 5.20 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	116
Figura 5.21 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	117
Figura 5.22 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	118
Figura 5.23 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	118
Figura 5.24 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	119
Figura 5.25 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente...	119
Figura 5.26 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo $\theta$ - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	120
Figura 5.27 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões $V_n$ e $V_p$ - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ..	121
Figura 5.28 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	121
Figura 5.29 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	122
Figura 5.30 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. ....	122

Figura 5.31 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	123
Figura 5.32 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	124
Figura 5.33 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FT- <i>a</i> em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente...	124
Figura 5.34 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição I - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	125
Figura 5.35 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição II - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	126
Figura 5.36 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição III - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	127
Figura 5.37 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição IV - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	128
Figura 5.38 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição V - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT- <i>a</i> em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.....	129
Figura 5.39 - Linha de transmissão CAM-GUA2 - sistema interligado nacional.....	130
Figura 5.40 - Corrente de falta na fase <i>a</i> para a FAI FT- <i>a</i> real na linha de transmissão CAM-GUA2.....	130
Figura 5.41 - Corrente de falta na fase <i>c</i> para a FAI FT- <i>c</i> real na linha de transmissão CAM-GUA2.....	131
Figura 5.42 - Sinais trifásicos de tensão e corrente das FAI reais ocorridas na linha de transmissão CAM-GUA2: (a) FAI FT- <i>a</i> ; (b) FAI FT- <i>c</i> .....	131

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Características gerais das técnicas de LDFAI.....	54
Quadro 3.2 - Estruturas das matrizes de impedâncias.....	72
Quadro 4.1 - Características gerais das técnicas de LDFAI.....	82



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros da resistência variável no tempo $R_F(t)$ .....	44
Tabela 2.2 - Coeficientes do polinômio de $R_F(t)$ para cada tipo de superfície de contato .....	46
Tabela 5.1 - Parâmetros do sistema de potência usado nas simulações. ....	100
Tabela 5.2 - Distâncias entre condutores na estrutura de sustentação da linha de transmissão. ....	100
Tabela 5.3 - Parâmetros usados nas simulações para análise de sensibilidade. ....	104
Tabela 5.4 - Parâmetros usados nas simulações para análise comparativa. ....	104
Tabela 5.5 - Resultados das estimativas de localização de faltas de alta impedância reais. ..	132





## LISTA DE ABREVIATURAS

ABCS	Abordagem Baseada em Componentes de Sequências
ABMQ	Abordagem Baseada em Mínimos Quadrados
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FAI	Falta de Alta Impedância
GPS	<i>Global Positioning System</i>
LDF	Localização de Falta
LDFAI	Localização de Falta de Alta Impedância
LTEE	Linha de Transmissão de Energia Elétrica
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
RDF	Registrador Digital de Falta
RDP	Registrador Digital de Perturbação
RP	Relé de Proteção
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TC	Transformador de Corrente



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
1.1	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA .....	33
1.2	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	34
1.3	ESTRUTURA DA TESE .....	34
<b>2</b>	<b>FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA E MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO: CARACTERÍSTICAS E GENERALIDADES.....</b>	<b>37</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	37
2.2	CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ....	37
2.2.1	Falta de Alta Impedância: Características Importantes.....	38
2.2.2	Falta de Alta Impedância: Principais Modelos.....	40
2.2.3	Falta de Alta Impedância: modelo utilizado.....	43
2.3	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	47
2.3.1	Método Baseado no Fenômeno das Ondas Viajantes .....	48
2.3.2	Método Baseado na Impedância Aparente.....	50
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	52
<b>3</b>	<b>LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>53</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	53
3.2	PRINCIPAIS TÉCNICAS EXISTENTES: ESTADO DA ARTE.....	54
3.2.1	Proposta de DJURIC, RADOJEVIC e TERZIJA (1999).....	55
3.2.2	Proposta de RADOJEVIC, TERZIJA e DJURIC (2000).....	58
3.2.3	Proposta de LEE <i>et al.</i> (2006) .....	59
3.2.4	Proposta de RADOJEVIC e SHIN (2006) .....	62
3.2.5	Proposta de RADOJEVIC (2007) .....	66
3.2.6	Proposta de IBRAHIM <i>et al.</i> (2010) .....	66
3.2.7	Proposta de AHSAAE (2013).....	68
3.3	OBSERVAÇÕES E PONDERAÇÕES SOBRE AS PROPOSTAS EXISTENTES ....	70
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	72

<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO PROPOSTO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO: FORMULAÇÃO BASEADA NO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA APARENTE</b>	<b>75</b>
4.1	PROPOSIÇÃO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: ABORDAGEM PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO MONOFÁSICAS	75
4.1.1	Linha de Transmissão Monofásica Simples sob Falta	75
4.1.2	Estimativa de Fasores Consecutivos	77
4.1.3	Abordagem Baseada no Estimador de Mínimos Quadrados	78
4.1.4	Critérios para a Escolha da Amostra de Referência e da Taxa de Amostragem	80
4.2	PROPOSIÇÃO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: EXTENSÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS SIMPLES	82
4.2.1	Faltas Fase-Terra	84
4.2.2	Faltas Fase-Fase-Terra	85
4.2.3	Faltas Fase-Fase-Fase-Terra	86
4.3	PROPOSIÇÃO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: EXTENSÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS PARALELAS	87
4.3.1	Faltas Fase-Terra	89
4.3.2	Faltas Fase-Fase-Terra	91
4.3.3	Faltas Fase-Fase-Fase-Terra	92
4.4	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: DOIS EXEMPLOS	93
4.5	ALGORITMO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	95
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
<b>5</b>	<b>ESTUDOS DE CASOS E RESULTADOS</b>	<b>99</b>
5.1	ESTUDOS DE CASOS: DESCRIÇÕES	99
5.1.1	Descrições dos Estudos de Casos	100
5.2	ESTUDOS DE CASOS: RESULTADOS	105
5.2.1	Análise de Sensibilidade: faltas momentâneas e permanentes em linha simples	105
5.2.2	Análise de Sensibilidade: faltas momentâneas e permanentes em linha paralela	120
5.2.3	Análise Comparativa: faltas momentâneas e permanentes em linha simples	125
5.2.4	Casos Reais de Falta de Alta Impedância	129
5.3	ANÁLISE GERAL	132

5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	133
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>135</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	137
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>139</b>
	<b>ANEXO A: ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS.....</b>	<b>145</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão podem ser usadas para transmitir energia elétrica por longas distâncias e estão naturalmente expostas a severas condições climáticas, particularmente as linhas aéreas. Estatísticas mostram que entre 70% e 90% das faltas em linhas aéreas são momentâneas ou transitórias, com presença de arco elétrico, ao passo que as restantes são faltas permanentes que não são eliminadas por religadores automáticos, sendo que mais de 90% dessas faltas são monofásicas à terra (RADOJEVIC; SHIN, 2006; JAMALI; GHAFFARZADEH, 2012). A formação de arco elétrico no ponto da falta é uma das características da Falta de Alta Impedância (FAI) e resulta do pobre contato entre o condutor energizado e a superfície de contato (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996).

Nas últimas décadas, grandes esforços foram feitos para melhorar a segurança, a confiabilidade e a qualidade da energia elétrica que circula nos sistemas de transmissão. Para isso, diferentes esquemas de proteção e novas técnicas de detecção/localização de faltas têm sido propostos e implementados. Uma técnica de Localização de Faltas (LDF), com resultados precisos, contribui para melhorar o desempenho dos sistemas de potência, pois possibilita a redução do tempo de interrupção no fornecimento de energia. Em relação aos métodos de LDF, estes são divididos, basicamente, em dois grupos: os que são fundamentados na impedância aparente e os que são baseados no fenômeno das ondas viajantes. Cada um desses métodos possui suas vantagens e particularidades, entretanto o método fundamentado na impedância aparente é mais amplamente utilizado devido à sua simplicidade e reduzido custo de implementação (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Ao longo dos últimos anos, inúmeros trabalhos foram apresentados e publicados abordando técnicas de LDF baseadas na impedância, sendo a maioria para faltas puramente resistivas (lineares). Contudo, abordagens em que faltas de alta impedância (não lineares) são consideradas, constituem escassas publicações disponíveis publicamente. Os trabalhos de (RADOJEVIC; SHIN, 2006; RADOJEVIC, 2007; LIN *et al.*, 2012) propõem técnicas para estimar a distância da falta, reconhecer a formação de arco elétrico no ponto da falta e determinar a amplitude da tensão deste arco elétrico. A partir desta informação é possível determinar o tipo de falta, se permanente (sem arco elétrico) ou se momentânea (com arco elétrico). Contudo, outras características importantes das FAI que serão apresentadas no Capítulo seguinte não são consideradas. A proposta de (IBRAHIM *et al.*, 2010) considera uma técnica de Localização de Faltas de Alta Impedância (LDFAI) para linhas de transmissão com dados não

sincronizados de ambos os terminais, utilizando o método de componentes simétricas. Nesta abordagem, as linhas de transmissão são consideradas idealmente transpostas e as impedâncias equivalentes dos sistemas a montante e a jusante da linha conhecidas. No entanto, nos casos de linhas não transpostas, a utilização do método de componentes simétricas não é adequada. Além disso, os valores das impedâncias equivalentes são dinâmicos e difíceis de serem calculados precisamente, o que pode introduzir erros significativos na estimativa da distância da falta.

As técnicas de LDF, baseadas no método da impedância aparente, que empregam dados de tensões e correntes de um terminal não requerem um canal de comunicação e sincronização entre os terminais da linha de transmissão, porém são sensíveis à resistência de falta, sendo esta um parâmetro a ser determinado (DALCASTAGNÊ *et al.*, 2008). Já as técnicas de LDF que utilizam dados de ambos os terminais da linha de transmissão necessitam que estes sejam sincronizados, contudo sua precisão não é afetada pela resistência de falta ou pelas variações dos sistemas equivalentes em cada terminal, ou seja, por variações na potência de curto-circuito (LIU *et al.*, 2012). Esta última afirmativa é verdadeira porque, conforme se verificará nos capítulos seguintes, as grandezas elétricas relacionadas à falta (tensão, corrente e resistência de falta) não compõem as equações de LDF e principalmente devido à usual consideração de que a resistência de falta é constante. Considerar a resistência de falta constante é uma simplificação que facilita a estimativa dos fasores de tensões e correntes empregados nas equações de LDF, estando estes sujeitos particularmente aos efeitos de uma componente contínua (do inglês *Direct Current* - DC), presente somente nos primeiros ciclos do período durante a falta. Contudo, na ocorrência de uma FAI existem as influências de características típicas, tais como *buildup*<sup>1</sup>, *shoulder*<sup>2</sup>, não-linearidades e assimetrias na forma de onda da corrente (NAM *et al.*, 2001), que devem ser levadas em conta nas abordagens de Localização de Faltas de Alta Impedância (LDFAI).

Linhas de transmissão são geralmente transpostas para que se obtenha um estado de operação equilibrado do sistema elétrico, desta forma, técnicas de LDF baseadas no método de componentes simétricas são reconhecidamente adequadas. Contudo, considerando a impossibilidade de transposição e que as características das linhas de transmissão não transpostas são tão diversas e de natureza complexa, o uso de componentes simétricas nos equacionamentos de LDF incorre em erros na estimativa da distância da falta (KANG *et al.*;

---

<sup>1</sup> Fase em que o valor da corrente de falta aumenta com o passar do tempo e atinge seu valor máximo após algumas dezenas de ciclos.

<sup>2</sup> Trechos em que a corrente de falta se mantém quase constante durante a fase de *buildup*.



2009). Ainda, no caso de linhas de transmissão com espaçamento assimétrico, o objetivo da transposição é restabelecer o equilíbrio das fases considerando os terminais da linha, de tal forma que todas as fases ocupem em média todas as possíveis posições no espaço, permitindo neste caso o uso das componentes simétricas (ZANETTA JR, 2005). Desta forma, o emprego de componentes simétricas, considerando-se a ocorrência de faltas entre os trechos de transposição, também pode resultar em erros nos resultados das técnicas de LDF.

A partir das considerações acima descritas e da revisão bibliográfica que será apresentada no Capítulo 4, em síntese, o desenvolvimento de uma técnica de LDFAI que considere na sua abordagem linhas de transmissão simples e paralelas, transpostas ou não, que leve em conta as principais características de uma FAI, que possa ser aplicada na localização de faltas momentâneas e permanentes, que tenha relativa simplicidade de implementação e com aplicabilidade a casos reais é o problema a ser resolvido nesta tese.

A proposição para a solução do problema acima formulado baseia-se em uma técnica de LDFAI fundamentada na impedância aparente e no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), desenvolvida no domínio da frequência e que utiliza componentes de fase. A partir de uma equação que estima a distância da falta em função dos parâmetros da linha de transmissão e dos fasores de tensão e corrente obtidos em ambos os terminais da linha, determina-se um sistema sobredeterminado de equações lineares, cuja solução é dada por meio da aplicação do MMQ. Tal sistema é obtido considerando-se o cálculo de consecutivos fasores de tensão e corrente durante o período de duração da FAI. Com esta abordagem é possível estimar a distância de FAI momentâneas e permanentes, em linhas de transmissão curtas simples e paralelas, transpostas ou não. Para avaliar a técnica de LDFAI proposta são realizadas simulações no programa ATP, cujos dados de tensões e correntes obtidos são aplicados no algoritmo de localização implementado no programa Matlab, bem como dados de FAI reais. Os resultados obtidos nos estudos de casos, considerando FAI simuladas e reais, indicam claramente que a abordagem proposta possui validade como técnica de LDFAI em linhas de transmissão em decorrência do desempenho demonstrado e, também, por características tais como: formulação simplificada no domínio da frequência, simplicidade e facilidade de implementação em dispositivos reais e aplicabilidade a casos reais de FAI.

## 1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Considerando a incidência das FAI em linhas de transmissão e a importância dos métodos de localização de faltas como contribuição para um rápido restabelecimento da energia elétrica, para a melhoria da confiabilidade dos SEP e da própria qualidade da energia

elétrica, o objetivo geral desta tese é contribuir para o desenvolvimento de uma técnica de LDFAI fundamentada na impedância aparente. Para isso esta tese possui os seguintes objetivos específicos:

- incorporar ao modelo de FAI proposto na literatura uma resistência de falta que varia com o tempo;
- considerar diferentes superfícies de contato no ponto da falta de forma a abranger os casos mais comuns de FAI reais;
- desenvolver uma abordagem de localização aplicada a FAI momentâneas e permanentes, em linhas de transmissão curtas simples e paralela, com ou sem transposição;
- considerar, na formulação proposta, o emprego de componentes de fase ao invés das simplificações usuais para a utilização de componentes simétricas;
- considerar, nos sinais de tensões e correntes utilizados, taxas de amostragens compatíveis com dispositivos comerciais;
- considerar a aplicabilidade da abordagem proposta a casos reais de FAI.

## 1.2 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Os objetivos a serem atingidos no desenvolvimento do trabalho aqui apresentado descrevem a sua efetiva importância. Contudo, em síntese, as principais contribuições dadas para o estado da arte das técnicas de localização de faltas de alta impedância em linhas de transmissão são: a consideração de uma resistência de falta que varia com o tempo no modelo de FAI proposto na literatura, a formulação de uma técnica de LDFAI fundamentada na impedância que emprega componentes de fase e a consideração de uma abordagem aplicada a linhas de transmissão curtas simples e paralelas, transpostas ou não.

## 1.3 ESTRUTURA DA TESE

Além dos aspectos apresentados nesse Capítulo, esta tese está estruturada da seguinte forma:

- no Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que aborda as características e generalidades das FAI, seus principais modelos representativos, bem como o intercâmbio de resistências no modelo de FAI proposto na literatura para considerar os fenômenos típicos desse tipo de falta; uma descrição dos principais métodos de LDF, com foco no método baseado na impedância aparente, também é apresentado;

- no Capítulo 3 é apresentada uma profunda revisão bibliográfica das principais técnicas de LDFAI fundamentadas na impedância aparente, cujos objetivos são expor o estado da arte sobre o assunto e embasar o entendimento das contribuições desta tese;
- no Capítulo 4 é apresentada a técnica de LDFAI proposta, considerada inicialmente para uma linha de transmissão monofásica com ocorrência de uma FAI fase-terra e estendida para linhas de transmissão trifásicas simples e paralela e demais tipos de faltas à terra;
- no Capítulo 5 apresentam-se os estudos de casos propostos, divididos basicamente em três grupos: a análise de sensibilidade da técnica proposta, análise comparativa entre a abordagem proposta e a que constitui o estado da arte e análise de aplicação a casos reais;
- no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões, considerando as respectivas contribuições agregadas e sugestões para trabalhos futuros.



## 2 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA E MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO: CARACTERÍSTICAS E GENERALIDADES

Neste Capítulo são apresentadas, formalmente, as definições, características e generalidades das faltas de alta impedância, bem como seus principais modelos representativos, e dos métodos de localização de faltas.

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As Linhas de Transmissão de Energia Elétrica<sup>3</sup> (LTEE) têm por finalidade transmitir energia elétrica por grandes distâncias e inevitavelmente cruzam por terrenos acidentados e operam sob severas condições climáticas. Estas características dificultam a localização de possíveis faltas ao longo de suas extensões, impedindo que se iniciem rapidamente as etapas de manutenção. Conforme (DALCASTAGNÊ, 2007), os principais agentes causadores de faltas em linhas de transmissão são:

- fenômenos naturais, tais como, descargas atmosféricas, tempestades, ventos fortes e queda de granizo sobre as linhas;
- contatos de condutores energizados das linhas com vegetações e animais;
- colisão de aeronaves e veículos com torres de sustentação e/ou linhas aéreas energizadas;
- falhas de componentes do próprio sistema, como deterioração de isoladores;
- queimadas;
- vandalismo.

Desta forma, a Localização de Faltas (LDF) pode ser definida como um processo que tem como objetivo determinar a distância do ponto de ocorrência de uma falta em relação a um dos terminais de uma determinada linha ou alimentador de maneira rápida e precisa. Para ilustrar o problema associado à LDF, a Figura 2.1 apresenta uma linha de transmissão sob falta em decorrência do contato entre uma das fases e uma árvore.

Nas seções e subseções seguintes serão definidos formalmente os principais tipos de faltas e métodos de localização.

### 2.2 CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Segundo (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957), as faltas em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) podem ser classificadas em momentâneas e permanentes. As fal-

---

<sup>3</sup> Por questão de simplicidade, ao longo do texto usar-se-á a expressão "linha de transmissão".

tas momentâneas decorrem normalmente de uma condição que se interrompe naturalmente ou pela atuação de um equipamento religador e se caracterizam pela duração de poucos ciclos. Tais faltas resultam do contato da vegetação com linhas aéreas energizadas e de descargas atmosféricas no entorno da linha ou alimentador. As faltas permanentes ou sustentadas requerem a atuação de relés e disjuntores de proteção, o que resulta na abertura da linha de transmissão envolvida no evento. Estas faltas derivam do contato envolvendo alguma das fases da linha ou entre estas e a terra, ruptura dos condutores da linha ou falha nos isoladores da rede. A LDF de uma falta momentânea, mesmo que esta seja autoextinguível, é importante, pois com o passar do tempo esse tipo de falta pode evoluir para um estado permanente.

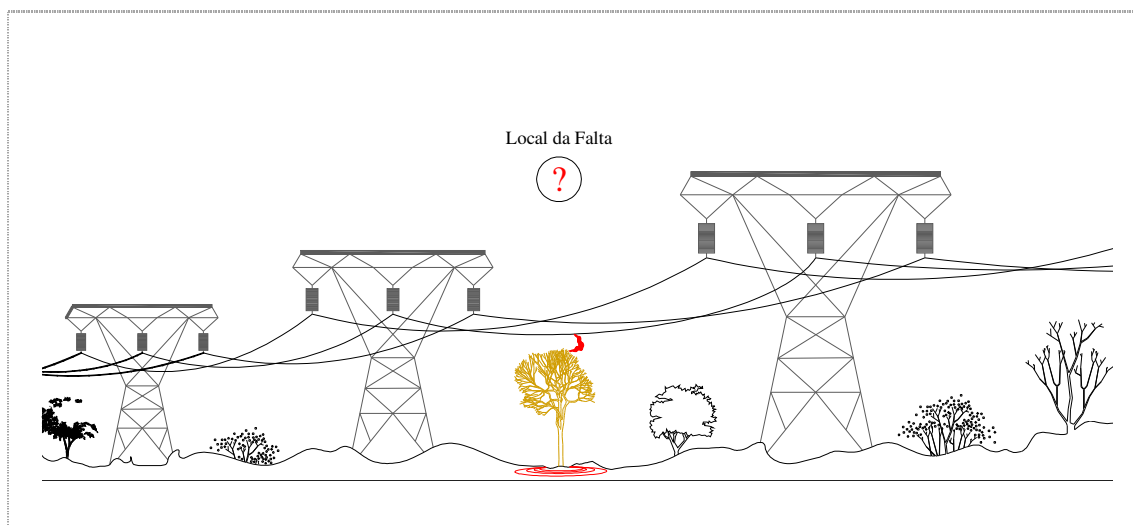


Figura 2.1 - Linha de transmissão sob falha.  
Fonte: O autor (2014).

Conforme (POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996), o contato de um condutor energizado com uma superfície de elevada resistência elétrica resulta em correntes pouco significativas para a atuação dos dispositivos de proteção, mas potencialmente perigosas para os seres vivos, faltas com estas características são denominadas Faltas de Alta Impedância (FAI). Na verdade, a ocorrência de FAI em LTEE pode resultar em correntes de falta da ordem de 2 pu a 5 pu, que são significativas para os dispositivos de proteção. Contudo, as FAI apresentam outra importante característica, que é o surgimento de um arco elétrico no ponto da falha, com comportamento não-linear, em decorrência da presença de uma camada de ar devido ao pobre contato entre o condutor energizado e a superfície envolvida.

### 2.2.1 Falta de Alta Impedância: Características Importantes

O trabalho de (JEERINGS; LINDERS, 1989) descreve satisfatoriamente o comportamento físico de uma FAI resultante do contato de um condutor energizado com o solo. Se-

gundo os autores, o pobre contato entre o condutor e o solo resulta no reduzido valor inicial da corrente de falta e no aparecimento de um arco elétrico localizado, juntamente com a ionização do solo. Esta ionização ocorre também em camadas mais profundas do solo e não somente na superfície e dá origem a um "eletrodo equivalente". Devido aos fenômenos envolvidos, este eletrodo se comporta como uma resistência não linear e é responsável pela maior parte dos harmônicos observados nas correntes das FAI. Segundo (JEERINGS; LINDERS, 1989), a não linearidade típica na curva da tensão em função da corrente ( $v \times i$ ) observada nas FAI decorre de fenômenos intrínsecos do solo submetido a diferenças de potencial no ponto de contato da falta.

De acordo com (JEERINGS; LINDERS, 1989; EMMANUEL *et al.*, 1990; NAM *et al.*, 2001), os fenômenos físicos que envolvem às FAI dão origem a características elétricas típicas desses eventos, tais como:

- fase de *buildup*, em que o valor da corrente de falta aumenta com o passar do tempo e atinge seu valor máximo após algumas dezenas de ciclos;
- fase de *shoulder*, trechos em que a corrente de falta se mantém quase constante durante a fase de *buildup*;
- não linearidade, observada na curva da tensão em função da corrente ( $v \times i$ );
- assimetria entre semi-ciclos da corrente de falta, em que o semi-ciclo positivo é diferente do semi-ciclo negativo.

Observou-se ainda que sempre que a presença de arco elétrico ao solo foi detectada, as características acima mencionadas são mantidas para quaisquer valores de correntes de falta. Além disso, a corrente de falta sempre atinge um estado estável entre 15 e 40 ciclos, de acordo com o tipo de solo.

A Figura 2.2 mostra a curva característica da tensão em função da corrente de uma FAI, na qual se observa nitidamente a relação não linear entre as duas grandezas elétricas.

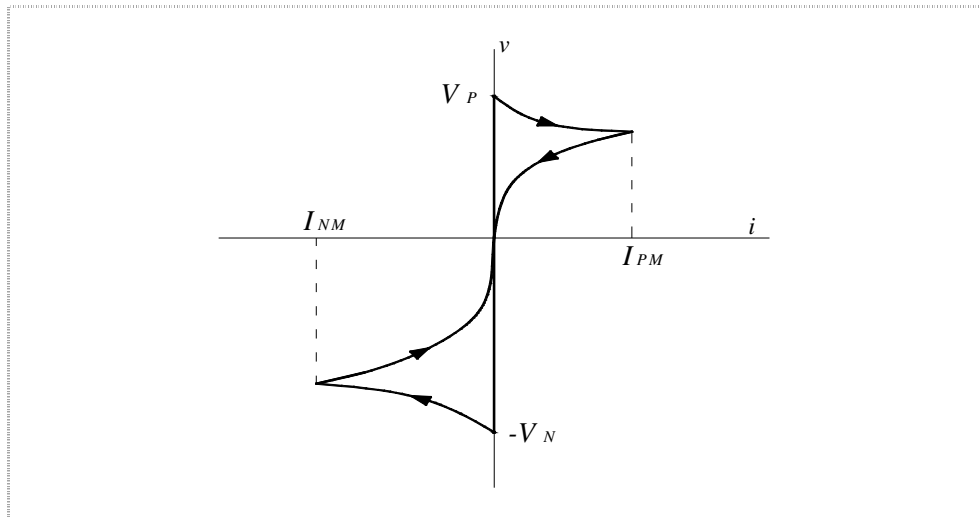


Figura 2.2 - Curva característica da tensão em função da corrente de uma FAI.  
Fonte: (EMMANUEL *et al.*, 1990).

A Figura 2.3 mostra a curva da corrente em função do tempo de uma FAI típica, em que se observam as características de *buildup* e *shoulder*.

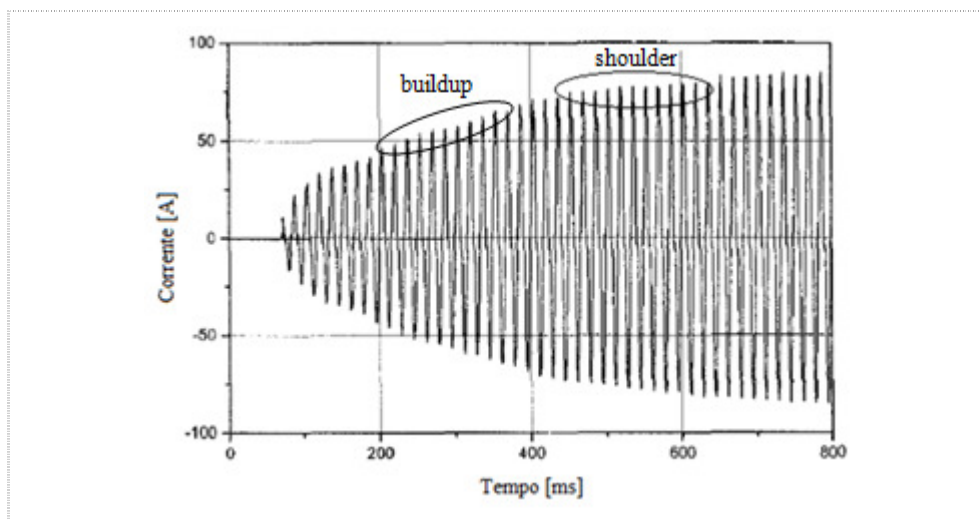


Figura 2.3 - Curva da corrente em função do tempo de uma FAI típica.  
Fonte: (NAM *et al.*, 2001).

### 2.2.2 Falta de Alta Impedância: Principais Modelos

Dentre os modelos representativos de FAI disponíveis na literatura, dois deles se destacam pelas suas capacidades de descrição e representação das principais características desse tipo de falta, as quais foram apresentadas na subseção 2.2.1. Desta forma, a seguir esses dois modelos serão descritos com mais detalhes.

O trabalho de (EMMANUEL *et al.*, 1990) propõe um modelo para reproduzir simplificada e as características do arco elétrico presente em uma FAI que consiste de um resistor em série com um indutor, ambos com valores constantes de resistência e indutância, combinados com dois diodos conectados em antiparalelo, com cada diodo em série com uma



fonte de tensão contínua, conforme mostra a Figura 2.4. Esse modelo de FAI foi baseado em experimentos e testes de campo realizados em um sistema de distribuição com tensão e frequência nominais de 13,8 kV e 60 Hz, respectivamente.

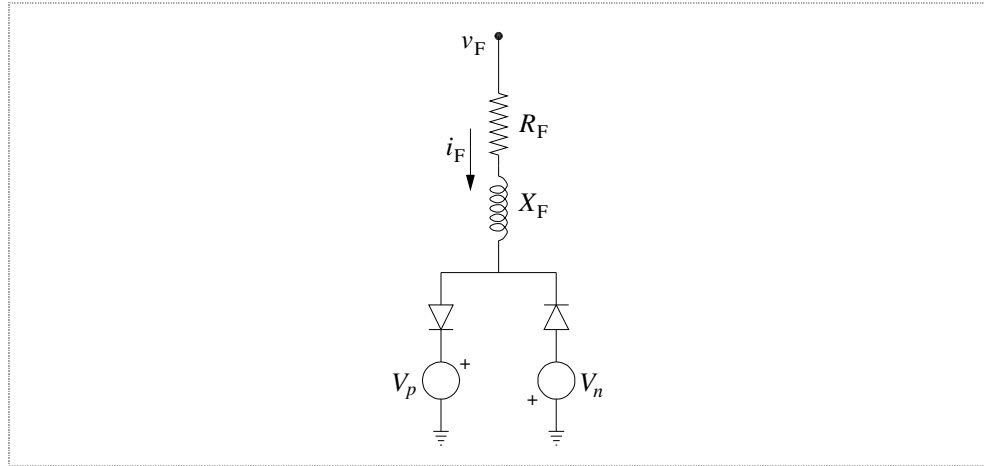


Figura 2.4 - Modelo de FAI baseado em diodos em antiparalelo com resistência constante. Fonte: (EMMANUEL *et al.*, 1990).

Nesse modelo, o arco é modelado utilizando duas fontes de tensão contínua de valores  $V_p$  e  $V_n$ , conectadas conforme mostra a Figura 2.4. Durante os semiciclos positivo e negativo a corrente circula pelos ramos  $p$  e  $n$ , respectivamente. De acordo com (EMMANUEL *et al.*, 1990), com esta configuração é possível controlar a assimetria da corrente da FAI mediante valores escolhidos de  $V_p$  e  $V_n$ . Além disso, a diferença entre os valores de  $V_n$  e  $V_p$  ( $\Delta V = V_n - V_p$ ) indica a presença de uma harmônica de segunda ordem na corrente de falta, sendo que a influência desta harmônica aumenta com o incremento de  $\Delta V$ . Por sua vez, a presença de uma harmônica de terceira ordem está relacionada com a  $\tan(\theta)$ , em que  $\theta = \tan^{-1}(X_F / R_F)$ , em que a influência desta harmônica aumenta com o decremento da  $\tan(\theta)$ .

Cabe ressaltar que, para condições com  $X_F = 0 \Omega$ ,  $V_p = V_n = 0 \text{ V}$ , o modelo de FAI mostrado na Figura 2.4 resume-se ao modelo de uma falta de resistência constante (falta linear). Desta forma, é possível concluir que uma falta puramente resistiva é um caso particular de uma FAI para condições específicas e peculiares. A Figura 2.5 mostra as curvas das correntes de faltas resultantes de simulações implementadas no *Alternative Transients Program* (ATP) (BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007), considerando-se uma linha de transmissão de 69 kV. A Figura 2.5(a) retrata o resultado da corrente de falta para condições em que com  $X_F = 0 \Omega$ ,  $V_p = V_n = 0 \text{ V}$  e  $R_F = 64 \Omega$ . A Figura 2.5(b) mostra o resultado da corrente de uma falta com resistência constante em que  $R_F = 64 \Omega$ . Observa-se na Figura 2.5 que ambos os resultados são iguais.

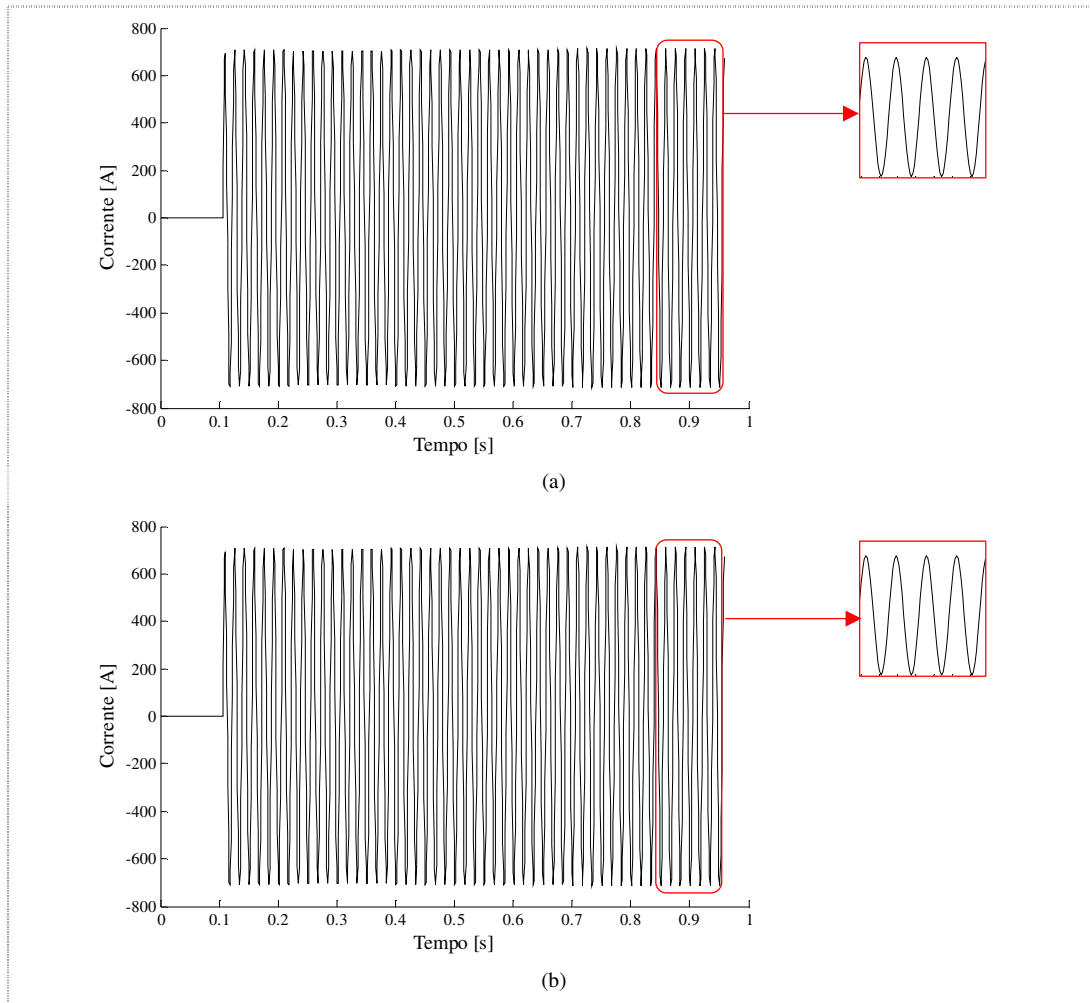


Figura 2.5 - Curvas de correntes de faltas: (a) caso particular de uma FAI; (b) falta puramente resistiva. Fonte: O autor (2014).

O modelo apresentado por (NAM *et al.*, 2001) para representar as principais características de uma FAI (*buildup*, *shoulder*, assimetria e não linearidade) é composto por dois resistores controlados por uma ferramenta TACS<sup>4</sup>, conforme mostra a Figura 2.6. Tal modelo foi idealizado para permitir sua implementação no programa ATP. Neste modelo, o resistor  $R_1(t)$  segue a característica não linear e assimetria da curva  $v_F \times i_F$ , mantida idêntica em todos os ciclos. O resistor  $R_2(t)$  é responsável pela caracterização dos fenômenos de *buildup* e *shoulder* a partir da variação da sua resistência ao longo do tempo.

<sup>4</sup> *Transient Analysis of Control Systems* é um módulo do ATP que permite o uso de componentes controlados por grandezas medidas em outros pontos do circuito, possibilitando a modelagem de componentes não-lineares.

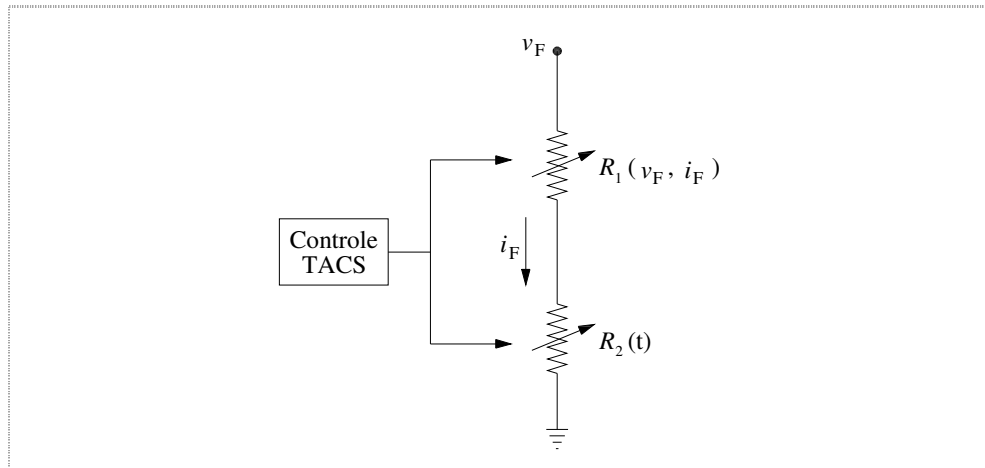


Figura 2.6 - Modelo de FAI baseado no controle por TACS.  
Fonte: (NAM *et al.*, 2001).

Uma proposição para a modelagem do resistor  $R_2(t)$  é apresentada em (SANTOS *et al.*, 2013). Segundo os autores, cada tipo de superfície de contato envolvida na FAI implica diferentes curvas  $v_F \times i_F$  e valores de amplitude máxima de corrente. Essas diferenças decorrem de características específicas da composição das superfícies de contato, tais como: porosidade, umidade e densidade. A partir de experimentos e testes de campo considerando areia, asfalto, cascalho, paralelepípedo e grama como superfícies de contato no ponto da falta, a curva característica de  $R_2(t)$  é definida segundo o seguinte polinômio:

$$R_2(t) = \begin{cases} a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0, & \text{se } t < \Delta t \\ 10^{-5}, & \text{se } t \geq \Delta t \end{cases}, \quad (2.1)$$

onde  $n$  e  $a_k$  são o grau e os coeficientes do polinômio, respectivamente,  $\Delta t$  é o período transitório da FAI. Na subseção apropriada serão apresentadas as curvas das correntes de FAI para as superfícies de contato consideradas, bem como os respectivos valores dos coeficientes desse polinômio.

### 2.2.3 Falta de Alta Impedância: modelo utilizado

Considerando que o modelo de FAI proposto por (EMMANUEL *et al.*, 1990), mostrado na Figura 2.4, apresenta relativa simplicidade de implementação em programas como o ATP, esse fora adotado nos estudos de casos para avaliação de desempenho da abordagem de LDF proposta nesta tese. Entretanto, o emprego do resistor  $R_F$ , de resistência constante, não permite a representação dos fenômenos de *buildup* e *shoulder*, frequentemente observados em FAI reais.

A partir dessa limitação, propõe-se a substituição do resistor  $R_F$  por outro que considere uma resistência que varia com o tempo, denominado  $R_F(t)$ , que pode ser descrito pelo

polinômio da expressão (2.1). Assim sendo, o modelo de FAI modificado assume a forma mostrada na Figura 2.7.

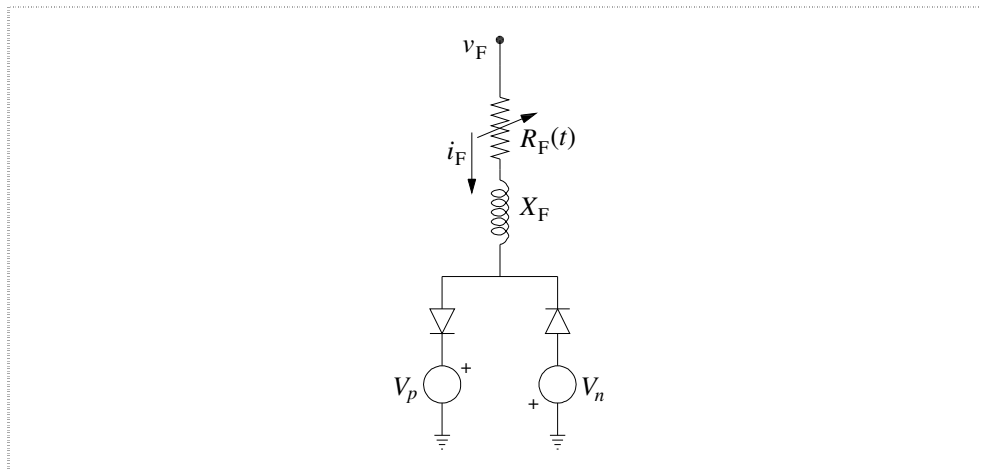


Figura 2.7 - Modelo de FAI em diodos em antiparalelo com resistência variável.  
Fonte: (EMMANUEL *et al.*, 1990) - modificado.

Para avaliar os efeitos do intercâmbio entre os resistores  $R_F$  e  $R_F(t)$  no modelo de FAI proposto por (EMMANUEL *et al.*, 1990), considere a resistência variável no tempo  $R_F(t)$  descrita na Tabela 2.1 e uma FAI real registrada em uma linha de transmissão de 69 kV mostrada na Figura 2.8(a). As Figuras 2.8(b) e 2.8(c) mostram as curvas das correntes de faltas resultantes de simulações implementadas no ATP, considerando-se os parâmetros da linha de transmissão real de 69 kV. Na Figura 2.8(b) foi utilizado o modelo de FAI com  $R_F$  constante de 64  $\Omega$  e na Figura 2.8(c) o mesmo modelo de FAI, porém com a  $R_F(t)$  descrita na Tabela 2.1, cuja curva é mostrada na Figura 2.8(d). Comparando as três curvas da Figura 2.8, observa-se que os fenômenos de *buildup* e *shoulder* não são retratados quando empregado o modelo de FAI proposto por (EMMANUEL *et al.*, 1990). De outra forma, a utilização de uma resistência variável no tempo permite descrever com considerável fidelidade tais fenômenos.

Cabe ressaltar que os dados da Tabela 2.1 foram obtidos empiricamente de tal forma que o resultado da curva da corrente de falta simulada fosse semelhante às curvas das faltas reais disponibilizadas pela concessionária de energia elétrica.

Tabela 2.1 - Parâmetros da resistência variável no tempo  $R_F(t)$

$t$ [s]	0,107	0,125	0,153	0,175	0,188	0,223	0,245	0,305	0,348	0,498	0,597	0,723	0,881	0,960
$R_F$ [ $\Omega$ ]	4058	442	188	114	104	95	89	82	77	72	70	70	64	64

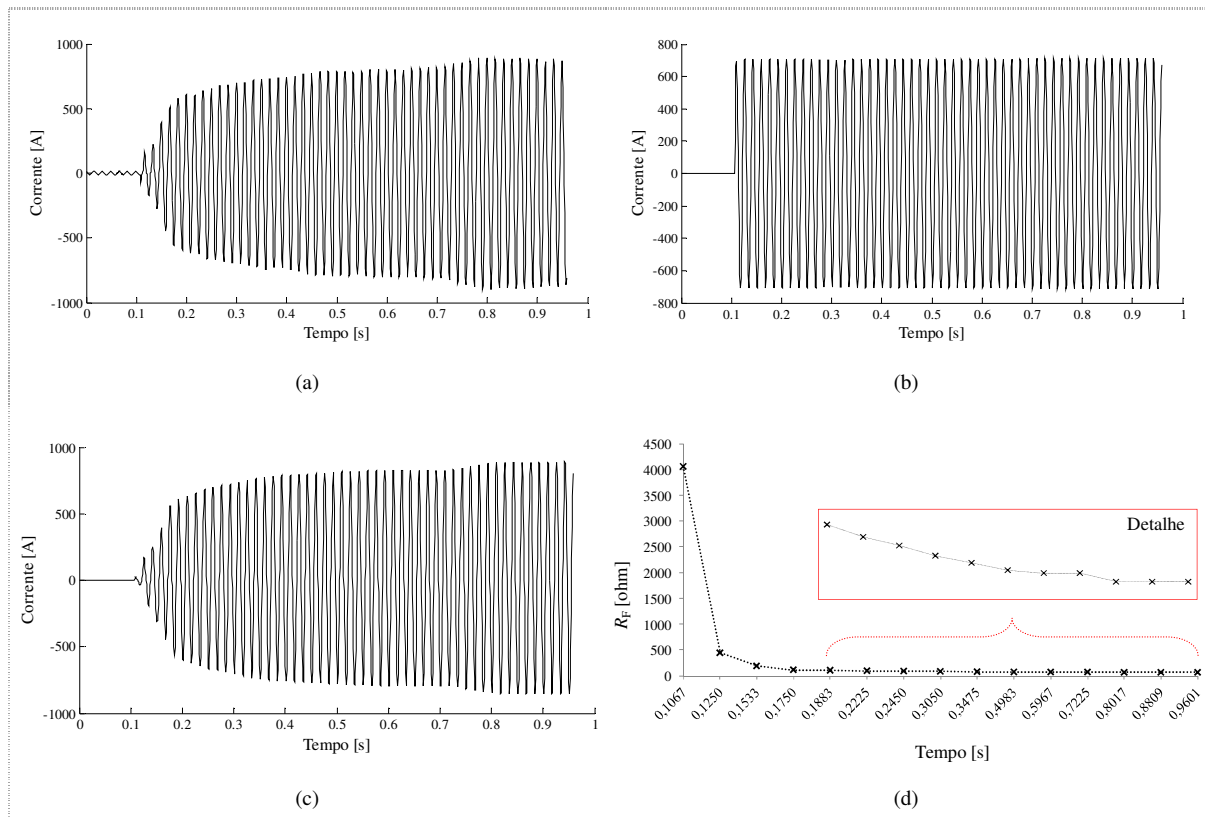


Figura 2.8 - Correntes de FAI: (a) FAI real; (b) modelo de FAI que utiliza resistência constante; (c) modelo de FAI que emprega resistência variável no tempo; (d) curva da  $R_F(t)$  definida na Tabela 2.1.  
Fonte: O autor (2014).

Para atender às necessidades das análises requeridas nos estudos de casos desta tese, particularmente no que se refere ao período de ocorrência dos fenômenos de *buildup* e *sholder* e da própria FAI, os valores dos coeficientes do polinômio descrito na expressão (2.1), propostos por (SANTOS *et al.*, 2013), foram modificados. Contudo, foram mantidas as formas de ondas determinadas nos experimentos e testes de campo para as seguintes superfícies de contato: areia, asfalto e grama. Além disso, a partir de registros dos sinais de tensões e correntes de FAI reais ocorridas em linhas de transmissão de 230 kV do sul do Brasil e das informações descritas pelas equipes de manutenção, duas outras superfícies de contato foram obtidas: solo local<sup>5</sup> e árvore.

As curvas características de  $R_F(t)$  podem ser determinadas de acordo com o seguinte polinômio:

$$R_F(t) = \begin{cases} a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0, & \text{para } t_{if} \leq t \leq t_{rp} \\ a_0, & \text{para } t > t_{rp} \end{cases}, \quad (2.2)$$

onde  $n$  e  $a_k$  são o grau e os coeficientes do polinômio, respectivamente,  $t_{if}$  é o instante do início da falta e  $t_{rp}$  é o instante em que  $R_2(t)$  atinge o valor de regime permanente. A Tabela 2.2

<sup>5</sup> Neste trabalho, solo local é qualquer outra superfície relatada que não se refere a areia, asfalto e grama.

mostra os coeficientes que devem ser usados no polinômio da expressão (2.2) para representar  $R_F(t)$  para cada tipo de superfície de contato.

Tabela 2.2 - Coeficientes do polinômio de  $R_F(t)$  para cada tipo de superfície de contato

Superfície	$a_9$	$a_8$	$a_7$	$a_6$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
Solo local	$-9,594 \cdot 10^{+8}$	$2,309 \cdot 10^{+9}$	$-2,344 \cdot 10^{+9}$	$1,306 \cdot 10^{+9}$	$-4,350 \cdot 10^{+8}$	$8,876 \cdot 10^{+7}$	$-1,097 \cdot 10^{+7}$	$7,949 \cdot 10^{+5}$	$-3,345 \cdot 10^{+4}$	$1,102 \cdot 10^{+3}$
Árvore	0	0	$5,440 \cdot 10^{+5}$	$-7,507 \cdot 10^{+5}$	$2,822 \cdot 10^{+5}$	$5,189 \cdot 10^{+4}$	$-6,397 \cdot 10^{+4}$	$1,719 \cdot 10^{+4}$	$-1,923 \cdot 10^{+3}$	$9,730 \cdot 10^{+1}$
Areia	$-4,807 \cdot 10^{+8}$	$1,202 \cdot 10^{+9}$	$-1,276 \cdot 10^{+9}$	$7,491 \cdot 10^{+8}$	$-2,653 \cdot 10^{+8}$	$5,800 \cdot 10^{+7}$	$-7,709 \cdot 10^{+6}$	$5,926 \cdot 10^{+5}$	$-2,455 \cdot 10^{+4}$	$5,782 \cdot 10^{+2}$
Asfalto	0	$8,595 \cdot 10^{+8}$	$-1,907 \cdot 10^{+9}$	$1,763 \cdot 10^{+9}$	$-8,805 \cdot 10^{+8}$	$2,572 \cdot 10^{+8}$	$-4,447 \cdot 10^{+7}$	$4,385 \cdot 10^{+6}$	$-2,223 \cdot 10^{+5}$	$4,678 \cdot 10^{+3}$
Grama	0	$1,016 \cdot 10^{+7}$	$-2,223 \cdot 10^{+7}$	$2,017 \cdot 10^{+7}$	$-9,818 \cdot 10^{+6}$	$2,775 \cdot 10^{+6}$	$-4,613 \cdot 10^{+5}$	$4,396 \cdot 10^{+4}$	$-2,279 \cdot 10^{+3}$	$7,056 \cdot 10^{+1}$

$t_{rp} = 0,5s$ .

Cabe destacar que (SANTOS *et al.*, 2013) propuseram valores para os coeficientes do polinômio de  $R_F(t)$  para representar superfícies do tipo areia, asfalto e grama baseados em experimentos e testes de campo em um sistema teste de 13,8 kV. Contudo, os valores apresentados na Tabela 2.2 não são os propostos por (SANTOS *et al.*, 2013), mas variações destes valores. Assim, os ajustes nos coeficientes permitem a utilização da expressão (2.2) em sistemas de transmissão de 230 kV.

A Figura 2.9 mostra as curvas da resistência de falta  $R_F(t)$  em função do tempo considerando a função polinomial da expressão (2.2) e coeficientes apresentados na Tabela 2.2 para as superfícies solo local e areia.

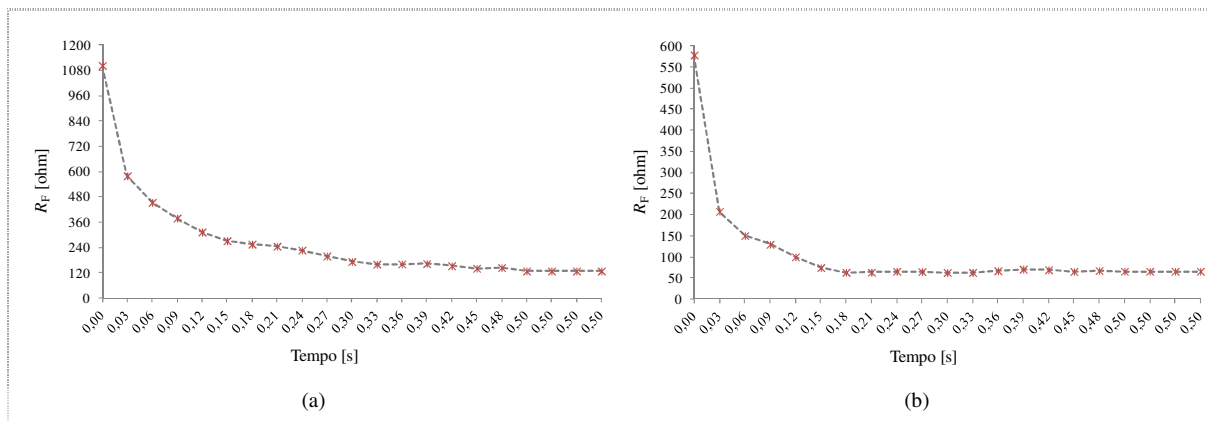


Figura 2.9 - Curvas das resistências de falta em função do tempo: (a) solo local; (b) areia.  
Fonte: O autor (2014).

Na Figura 2.10 são mostradas as curvas das correntes de FAI obtidas a partir de simulações realizadas no ATP considerando a resistência variável no tempo  $R_F(t)$  no modelo proposto por (EMMANUEL *et al.*, 1990) para cada tipo de superfície de contato: (a) solo local, (b) árvore, (c) areia, (d) asfalto e (e) grama, sendo  $R_F(t)$  determinada segundo a função polinomial da expressão (2.2) e coeficientes apresentados na Tabela 2.2.

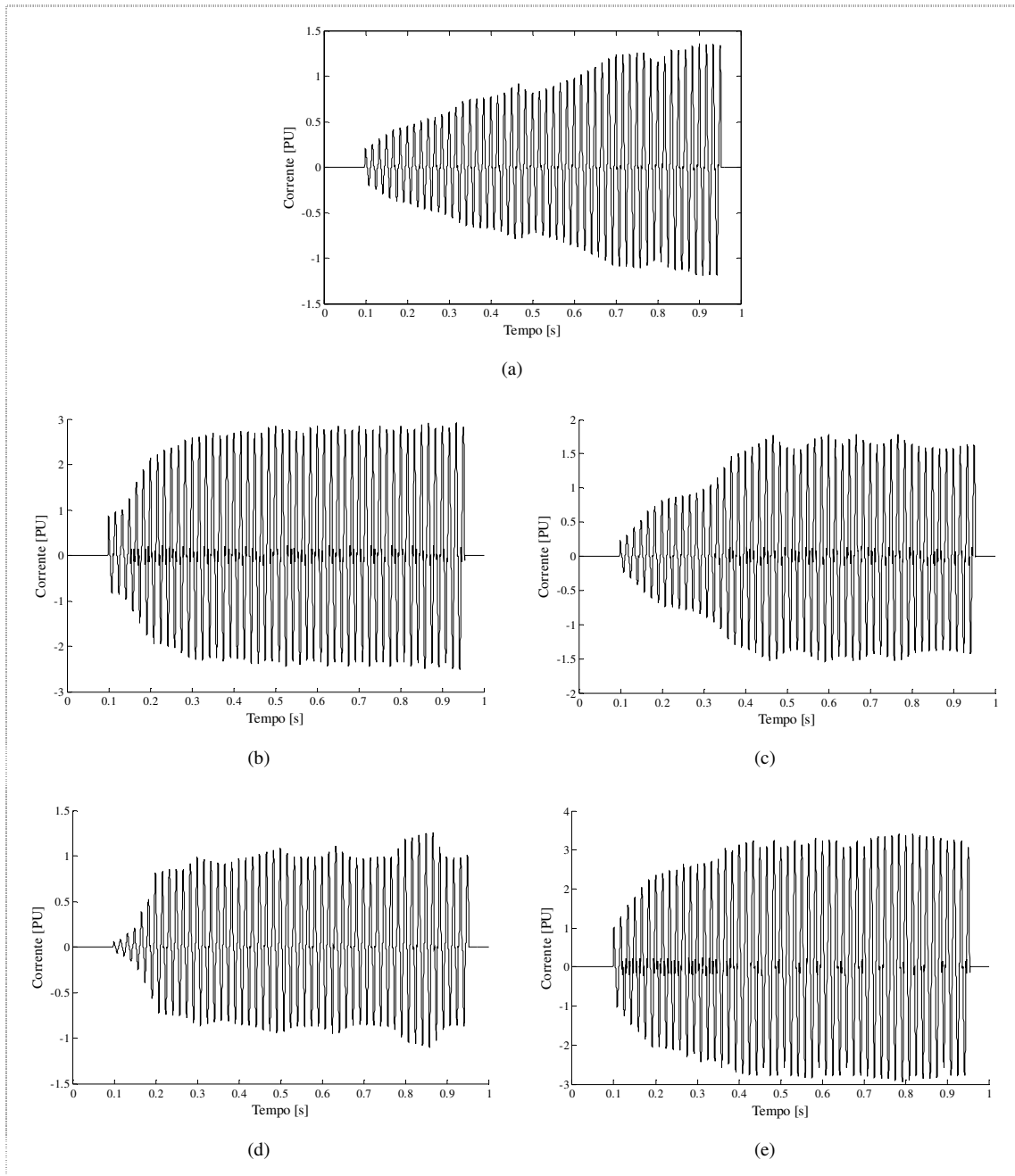


Figura 2.10 - Curvas das correntes de FAI obtidas a partir da função polinomial: (a) solo local; (b) árvore; (c) areia; (d) asfalto; (e) grama.

Fonte: O autor (2014).

### 2.3 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A localização de faltas em SEP pode ser realizada basicamente das seguintes formas: a partir da inspeção visual da rede elétrica e/ou da utilização de medidas elétricas<sup>6</sup>. Os métodos automáticos de LDF podem ser classificados em dois grupos:

<sup>6</sup> Os métodos que utilizam as grandezas elétricas da rede e registradores para a localização da falta, em contrapartida às técnicas baseadas na inspeção visual, são denominados automáticos.

- I. **método baseado no fenômeno das ondas viajantes:** neste método são utilizados os registros de oscilografias das ondas eletromagnéticas de alta frequência geradas por mudanças bruscas nas condições de operação do sistema;
- II. **método baseado na medida da impedância aparente:** neste método são utilizadas as medidas das componentes fundamentais das tensões e das correntes para a determinação da impedância aparente entre um dado terminal da linha de transmissão e o ponto da falta.

De acordo com o(s) local(is) onde as grandezas elétricas de tensão e corrente são medidas, os métodos de LDF podem ser divididos ainda em dois grupos: os que utilizam dados de somente um terminal (medição a um terminal) e os que empregam dados de dois ou mais terminais (medição a dois ou mais terminais). Para este grupo, os dados são sincronizados com a mesma referência de tempo por meio do sistema de posicionamento global (do inglês *Global Positioning System - GPS*) (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

A Figura 2.11 apresenta um panorama geral das principais abordagens empregadas para a localização de faltas em SEP.

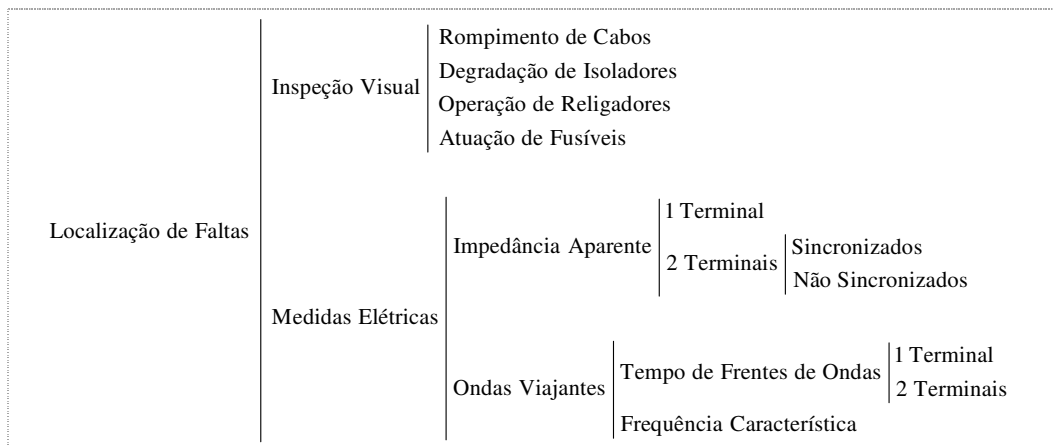


Figura 2.11 - Classificação dos métodos de localização de faltas em sistemas elétricos de potência.  
Fonte: (ANDRADE; PONCE de LEÃO, 2012) - modificado.

### 2.3.1 Método Baseado no Fenômeno das Ondas Viajantes

A mudança no estado de operação de um SEP em decorrência da incidência de descargas atmosféricas, chaveamentos e/ou manobras e faltas resultam em ondas eletromagnéticas de altas frequências que viajam ao longo das linhas da rede elétrica. Assim, a ideia essencial do método de LDF baseado nas ondas viajantes consiste na determinação do intervalo de tempo de viagem da onda de tensão ou de corrente entre o ponto da falta e o ponto de monitoração e da velocidade de propagação da onda viajante na linha de transmissão, a partir dessas



informações a distância da falta pode ser estimada (MAGNANO; ABUR, 1998). Uma extensão do método por ondas viajantes, denominado método de altas frequências, consiste na determinação da frequência característica do sinal transitório gerada pela ocorrência de uma falta, pois tal frequência está relacionada com a distância da falta em uma linha de transmissão (SWIFT, 1979).

A Figura 2.12 mostra as ondas viajantes geradas por uma falta em uma LTEE, em que a distância da falta  $d$  pode ser estimada a partir dos tempos de chegada das frentes de ondas nos Registradores Digitais de Perturbações<sup>7</sup> (RDP) ou pela frequência característica do sinal transitório registrada no terminal local.

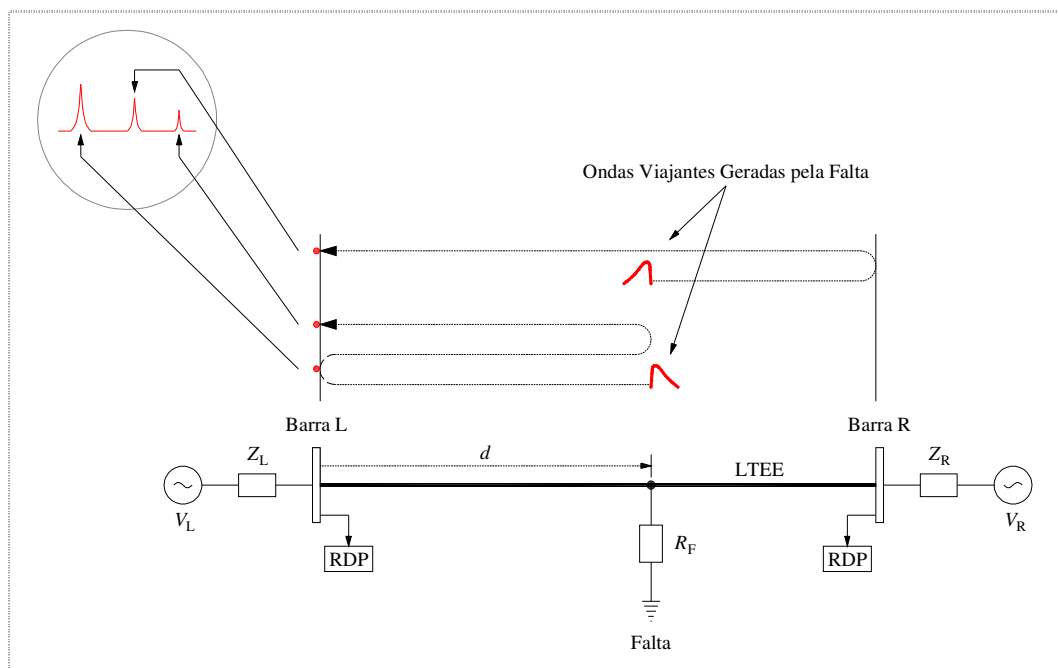


Figura 2.12 - Ondas viajantes geradas por uma falta em uma linha de transmissão.  
Fonte: (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957) - modificado.

Conforme (BO, *et. al.*, 2000; SILVA; OLESKOVICZ; COURY, 2004), o desempenho do método de LDF baseado nas ondas viajantes apresenta imunidade à saturação dos Transformadores de Corrente (TC), ao tipo de falta, à resistência de falta, ao ângulo de incidência da falta e aos parâmetros dos sistemas equivalentes dos terminais local e remoto. Entretanto, a maior limitação desse método está na necessidade de altas taxas de amostragem do sinal transitório, o que limita sua implementação em registradores de faltas convencionais.

<sup>7</sup> Equipamento que inclui oscilógrafos, registradores digitais de faltas, relés de proteção e registradores de transitórios capaz de registrar faltas nos SEP (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2006).

### 2.3.2 Método Baseado na Impedância Aparente

O método baseado na impedância aparente consiste em determinar a impedância aparente do trecho da linha de transmissão sob falta a partir das medições das componentes fundamentais das tensões e/ou correntes registradas em um ou mais terminais da linha. A partir da relação entre a impedância aparente e os parâmetros da linha de transmissão é possível estimar a distância da falta (TAKAGI *et al.*, 1982b).

Considerando as técnicas de LDF baseados no método da impedância aparente, as que utilizam dados de tensão e/ou corrente medidos em um terminal são simples e possuem razoável precisão. Desta forma, possuem aplicações práticas e são facilmente incorporados aos relés de proteção digitais. Já os algoritmos que utilizam dados de tensões e/ou correntes medidos em ambos os terminais apresentam uma maior precisão e um desempenho superior em relação aos anteriores, entretanto necessitam de GPS para o sincronismo de tempo entre os terminais da LTEE (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

Para explicar o método baseado na impedância aparente, considere a LTEE monofásica sob falta com medições na Barra L mostrada na Figura 2.13.

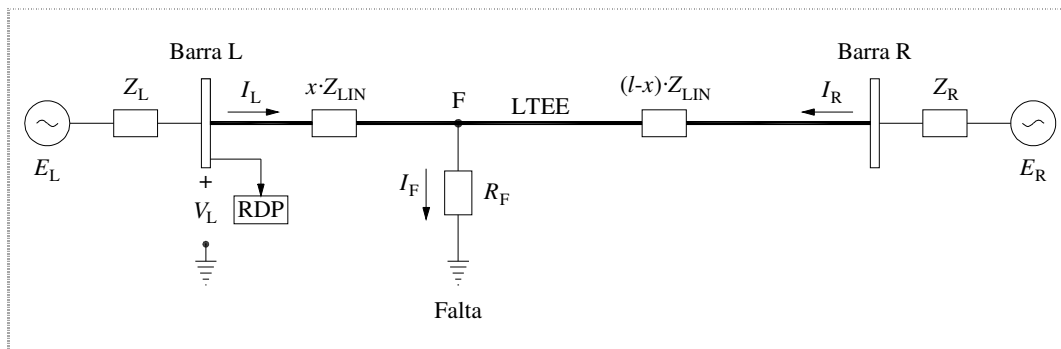


Figura 2.13 - LTEE monofásica sob falta com dados medidos no terminal local.  
Fonte: O autor (2014).

Os símbolos mostrados na Figura 2.13 são assim definidos:

- $E_L$  fonte equivalente da barra local [V];
- $E_R$  fonte equivalente da barra remota [V];
- $V_L$  tensão de fase da barra local [V];
- $V_R$  tensão de fase da barra remota [V];
- $I_L$  corrente de linha da barra local [A];
- $I_R$  corrente de linha da barra remota [A];
- $I_F$  corrente de falta [A];
- $Z_{LIN}$  impedância da linha de transmissão [ $\Omega$ /km];
- $Z_L$  impedância equivalente da barra local [ $\Omega$ ];

- $Z_R$  impedância equivalente da barra remota [ $\Omega$ ];  
 $x$  distância da falta em relação à barra local [km];  
 $l$  comprimento total da linha de transmissão [km].

A aplicação das leis de Kirchoff no diagrama da Figura 2.13 resulta em:

$$V_L = x I_L Z_{LIN} + R_F I_F = x I_L Z_{LIN} + R_F (I_L + I_R). \quad (2.3)$$

A expressão (2.3) pode ser reescrita conforme (2.4):

$$\frac{V_L}{I_L} = x Z_{LIN} + R_F \frac{(I_L + I_R)}{I_L}, \quad (2.4)$$

ou ainda como:

$$Z_{AP} = \frac{V_L}{I_L} = x Z_{LIN} + R_F \frac{(I_L + I_R)}{I_L}, \quad (2.5)$$

onde  $Z_{AP}$  é a impedância aparente da LTEE sob falta determinada a partir da Barra L. Desta forma, o valor percentual  $x$  pode ser estimado segundo (2.6):

$$x = \frac{Z_{AP}}{Z_{LIN}} - \underbrace{\frac{R_F}{Z_{LIN}} \cdot \frac{(I_L + I_R)}{I_L}}_M. \quad (2.6)$$

Conforme pode ser observado na equação (2.6), o termo M introduz um erro na estimativa da distância da falta, pois os valores da resistência de falta  $R_F$  e da corrente  $I_R$  do terminal remoto (Barra R) devem ser estimados para a condição em que se dispõe de medições de somente um terminal. Entretanto, a determinação de  $x$  é direta quando a  $R_F$  é zero ou pode ser desprezada. Além disso, a grande maioria dos trabalhos de LDF disponíveis na literatura considera em suas formulações a resistência de falta constante no tempo, ou seja, um caso particular de uma FAI.

Segundo (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2004), uma melhor estimativa na localização de uma falta, considerando o método baseado na impedância aparente, está diretamente relacionada com a precisão no cálculo das impedâncias das linhas de transmissão. O método mais utilizado para a determinação de tais impedâncias está fundamentado nas equações modificadas de Carson (KERSTING, 2002). Outro método usado envolve a medição direta de circuito aberto das linhas de transmissão, contudo, neste caso, a precisão é similar à obtida quando usadas as equações de Carson. Um terceiro método envolve a estimativa dos parâmetros da linha de transmissão por meio da teoria de quadripolos com base em medições fasoriais obtidas diretamente em um relé digital ou em um

registrador digital. A utilização de um registrador digital com taxa de amostragem mais alta pode resultar em valores de impedâncias com elevada precisão.

Além da influência dos parâmetros da linha de transmissão, a precisão na determinação do ponto da falta vai depender da técnica de LDF empregada, da taxa de amostragem dos dados registrados, bem como da presença de variáveis desconhecidas, mais notavelmente da resistência e do tipo de falta (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2004).

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse Capítulo, as definições de falta momentânea e permanente foram apresentadas, bem como o conceito, as características, as generalidades e os principais modelos representativos da falta de alta impedância. Outro aspecto considerado foi a proposição de intercâmbio entre os resistores  $R_F$  e  $R_F(t)$  no modelo de FAI proposto por (EMMANUEL *et al.*, 1990) para permitir a representação dos fenômenos de *buildup* e *shoulder* na corrente de falta. Foram definidas, também, cinco diferentes superfícies de contato para descrever distintos comportamentos da corrente de falta durante a ocorrência de uma FAI. Definições, classificações e características dos métodos de LDF também foram retratadas nesse Capítulo.

O Capítulo seguinte versará sobre a revisão bibliográfica das principais técnicas de LDF de alta impedância baseadas na impedância aparente.

### 3 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este Capítulo apresenta uma revisão bibliográfica das principais técnicas relacionadas à localização de faltas de alta impedância fundamentadas no método da impedância aparente, particularmente aplicadas a linhas de transmissão. Tal revisão tem por objetivo expor o estado da arte desse campo de pesquisas e embasar a compreensão da contribuição desta tese.

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir dos anos 1980 inúmeras técnicas relacionadas à LDF em SEP foram desenvolvidas, principalmente a partir das propostas apresentadas por (TAKAGI *et al.*, 1981; TAKAGI *et al.*, 1982a; TAKAGI *et al.*, 1982b). Todavia, técnicas para Localização de Faltas de Alta Impedância (LDFAI) em linhas de transmissão, fundamentadas no método da impedância aparente, são apresentadas em poucos trabalhos, tais como (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999; RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000; LEE *et al.*, 2006; RADOJEVIC; SHIN, 2006; RADOJEVIC, 2007; IBRAHIM *et al.*, 2010; AHSAAE, 2013).

De uma forma geral, o objetivo das técnicas de LDFAI em linhas de transmissão consiste em estimar a distância da falta entre um determinado RDP e o ponto da falta, utilizando medidas de tensões e correntes obtidas em um único terminal (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999; RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000; RADOJEVIC; SHIN, 2006; RADOJEVIC, 2007) ou em dois terminais (LEE *et al.*, 2006; IBRAHIM *et al.*, 2010; AHSAAE, 2013), com dados sincronizados (LEE *et al.*, 2006) ou não sincronizados no tempo (IBRAHIM *et al.*, 2010; AHSAAE, 2013). Tais técnicas utilizam em seus algoritmos modelos de linhas a parâmetros concentrados (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999; RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000; LEE *et al.*, 2006; RADOJEVIC; SHIN, 2006; RADOJEVIC, 2007; IBRAHIM *et al.*, 2010) ou parâmetros distribuídos (AHSAAE, 2013). Em relação ao domínio de análise, são divididas em dois grupos: abordagem no tempo (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999; RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000; AHSAAE, 2013) e na frequência (LEE *et al.*, 2006; RADOJEVIC; SHIN, 2006; RADOJEVIC, 2007; IBRAHIM *et al.*, 2010).

O Quadro 3.1 sintetiza as características gerais das técnicas de LDFAI fundamentadas no método da impedância aparente que serão apresentadas na seção seguinte, bem como as características gerais da técnica de LDFAI proposta nessa tese.

Quadro 3.1 - Características gerais das técnicas de LDFAI.

Características		Referências							*
		A	B	C	D	E	F	G	
Terminais de Monitoração	1 Terminal	x	x		x	x			
	2 Terminais			x			x	x	x
Dados	Sincronizados			x					x
	Não Sincronizados						x	x	
Modelo da Linha	Parâmetros Concentrados	x	x	x	x	x	x		x
	Parâmetros Distribuídos							x	
Domínio de Análise	Tempo	x	x					x	
	Frequência			x	x	x	x		x
Representação do Sistema	Componentes de Fase								x
	Componentes Simétricas	x	x	x	x	x	x		
	Domínio Modal							x	
Linha de Transmissão	Transposta	x	x	x	x	x	x	x	
	Não Transposta								x

Fonte: O autor (2014).

Nota: Referência A: (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999)

Referência B: (RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000)

Referência C: (LEE *et al.*, 2006)

Referência D: (RADOJEVIC; SHIN, 2006)

Referência E: (RADOJEVIC, 2007)

Referência F: (IBRAHIM *et al.*, 2010)

Referência G: (AHSAAE, 2013)

\* Técnica proposta nessa tese

### 3.2 PRINCIPAIS TÉCNICAS EXISTENTES: ESTADO DA ARTE

Conforme mencionado anteriormente, existem poucos trabalhos disponíveis publicamente que abordam diretamente técnicas de LDFAI fundamentadas no método da impedância aparente para linhas de transmissão. Assim, a revisão bibliográfica deste capítulo seguirá a ordem de distribuição no tempo mostrada na Figura 3.1, conforme o ano de publicação de cada trabalho.

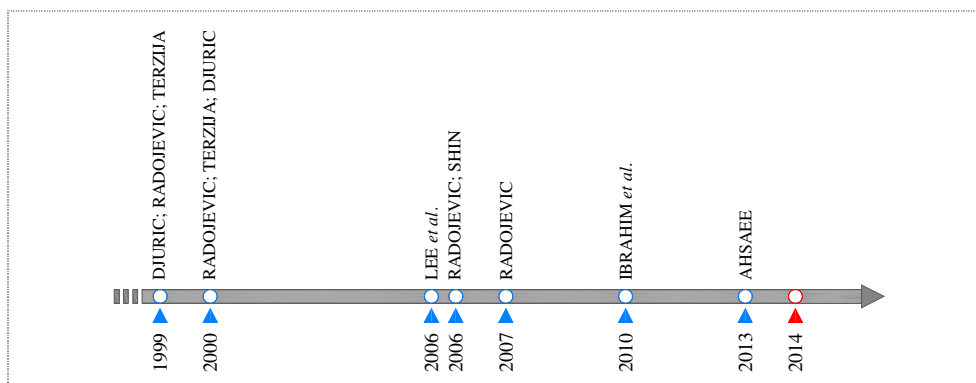


Figura 3.1 - Linha do tempo da revisão bibliográfica de LDFAI em linhas de transmissão.

Fonte: O autor (2014).

### 3.2.1 Proposta de DJURIC, RADOJEVIC e TERZIJA (1999)

O trabalho de (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999), embora não tenha como foco principal a LDFAI, apresenta uma técnica para detecção de faltas com formação de arco elétrico em linhas de transmissão utilizando o Método de Mínimos Quadrados<sup>8</sup> (MMQ). Segundo os autores, o algoritmo proposto pode ser empregado nos campos da proteção de distância e de localização de faltas.

Para compreensão da proposta de (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999), considere o segmento de uma linha de transmissão sob falta fase-terra com ocorrência de arco elétrico mostrado na Figura 3.2. Onde  $v_A$ ,  $v_B$  e  $v_C$  são as tensões de fase e  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  são as correntes no terminal esquerdo da linha;  $v_a$  é a tensão de arco da falta;  $R_a$  é a resistência de falta;  $v_F$  é a tensão de fase no ponto da falta.

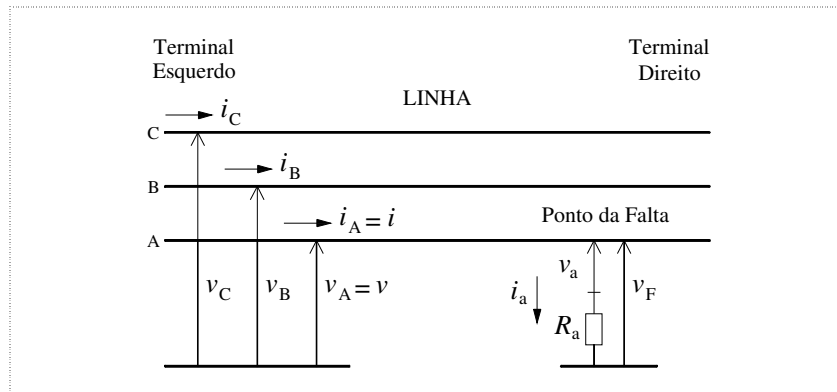


Figura 3.2 - Segmento de uma linha de transmissão sob falta com arco elétrico. Fonte: (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999).

Considere, ainda, os circuitos equivalentes de seqüências positiva e negativa, mostrados na Figura 3.3(a), e de seqüência zero, mostrado na Figura 3.3(b), do segmento de linha da Figura 3.2.

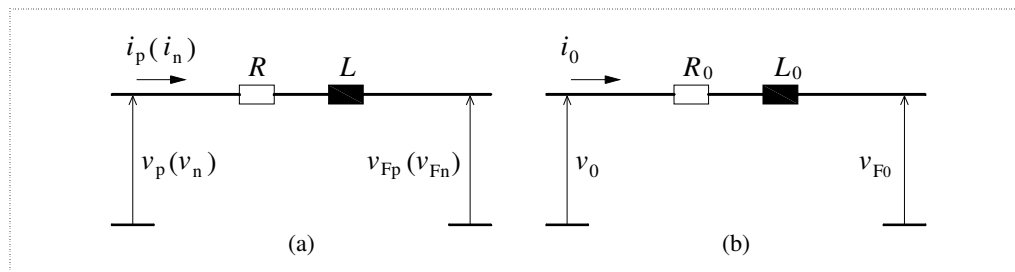


Figura 3.3 - Componentes de seqüências do segmento de linha da Figura 3.2. Fonte: (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999)

A partir dos diagramas de seqüências mostrados na Figura 3.3 escrevem-se as seguintes equações diferenciais:

<sup>8</sup> Uma revisão do método de mínimos quadrados é apresentada no Anexo A.

$$v_p = R i_p + L \frac{di_p}{dt} + v_{Fp}, \quad (3.1)$$

$$v_n = R i_n + L \frac{di_n}{dt} + v_{Fn}, \quad (3.2)$$

$$v_0 = R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + v_{F0}. \quad (3.3)$$

O somatório das expressões (3.1), (3.2) e (3.3) resulta na seguinte equação:

$$v = R i + (R_0 - R) i_0 + L \frac{di}{dt} + (L_0 - L) \frac{di_0}{dt} + v_F, \quad (3.4)$$

que é reescrita conforme:

$$v = R i + (R_0 - R) i_0 + L \left( \frac{di}{dt} + K_L \frac{di_0}{dt} \right) + v_F. \quad (3.5)$$

Da Figura 3.2, a tensão de fase no ponto da falta  $v_F$  é dada por:

$$v_F = v_a + R_a i_a. \quad (3.6)$$

Segundo os autores, a tensão de arco da falta  $v_a$  pode ser descrita por uma onda quadrada, corrompida por um ruído aleatório  $\xi$  segundo:

$$v_a(t) = V_a \operatorname{sgn}[i_a(t)] + \xi(t), \quad (3.7)$$

onde  $V_a$  é a amplitude da onda quadrada,  $\operatorname{sgn}$  é uma função definida como:  $\operatorname{sgn}(x) = 1$  se  $x \geq 0$  e  $\operatorname{sgn}(x) = -1$  se  $x < 0$  e  $\xi(t)$  é um ruído gaussiano de média zero. O valor de  $V_a$  é obtido a partir do produto do gradiente da tensão de arco<sup>9</sup> pelo comprimento do arco, ou seja, o comprimento do arco pode ser o comprimento de *flashover*<sup>10</sup> de uma cadeia de isoladores ou o comprimento de *flashover* entre condutores de fase.

A substituição da expressão (3.7) na (3.6) resulta em:

$$v_F = V_a \operatorname{sgn}[i_a(t)] + R_a i_a + \xi(t). \quad (3.8)$$

A partir das expressões (3.5) e (3.8) é determinado que:

$$v = R i + L \left( \frac{di}{dt} + K_L \frac{di_0}{dt} \right) + V_a \operatorname{sgn}[i_a(t)] + (R_0 - R) i_0 + R_a k_a i_0 + \varepsilon, \quad (3.9)$$

<sup>9</sup> O valor do gradiente da tensão de arco está entre 12 e 15 V/cm para a faixa de 100 A a 20 kA (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999)

<sup>10</sup> Descarga elétrica que ocorre através do ar ou ao longo de uma superfície isolante, produzida pela diferença de potencial elétrico entre dois pontos, em que o meio (ar ou superfície isolante) se torna suficientemente ionizado para manter um arco elétrico (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 1997).



onde, por simplicidade, considera-se  $i_a = k_a i_0$ , em que  $k_a$  é um coeficiente de proporcionalidade, e  $\varepsilon$  é o termo que contém os erros de medição e de modelagem da linha, juntamente com o ruído gaussiano do modelo do arco.

Finalmente, a expressão (3.9) é reescrita conforme:

$$v = Ri + L \left( \frac{di}{dt} + K_L \frac{di_0}{dt} \right) + V_a \operatorname{sgn}[i_a(t)] + R_e i_0 + \varepsilon, \quad (3.10)$$

onde  $R_e = (R_0 - R + k_a R_a)$ .

No terminal esquerdo do segmento de linha, mostrado na Figura 3.2, tensões e correntes podem ser uniformemente amostradas com uma frequência de amostragem  $f_s = 1/T$ , onde  $T$  é o período de amostragem. Um conjunto de  $N$  amostras de tensão e  $N+2$  amostras de corrente podem ser obtidas e descritas conforme:

$$\begin{array}{lll} v_1 = v(t_0 + T) & i_0 = i(t_0) & i_{00} = i_0(t_0) \\ v_2 = v(t_0 + 2T) & i_1 = i(t_0 + T) & i_{01} = i_0(t_0 + T) \\ \dots & i_2 = i(t_0 + 2T) & i_{02} = i_0(t_0 + 2T) \\ v_N = v(t_0 + NT) & \dots & \dots \\ & i_N = i(t_0 + NT) & i_{0N} = i_0(t_0 + NT) \\ & i_{N+1} = i(t_0 + (N+1)T) & i_{0(N+1)} = i_0(t_0 + (N+1)T) \end{array} \quad (3.11)$$

onde  $t_0$  é um instante arbitrário de referência.

A expressão (3.10) requer o cálculo numérico da derivada da corrente ( $di/dt$ ) e esta é aproximada segundo:

$$\frac{di(t)}{dt} \approx \frac{i_{n+1} - i_{n-1}}{2T}. \quad (3.12)$$

Assim, para a  $k$ -ésima amostra ( $k = 1, \dots, N$ ), tem-se que:

$$v_k = Ri_k + \frac{L}{2T} \left\{ i_{k+1} - i_{k-1} + K_L \left[ i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)} \right] \right\} + V_a \operatorname{sgn}(i_{0k}) + R_e i_{0k} + \varepsilon_k. \quad (3.13)$$

A expressão (3.13) é reescrita de acordo com:

$$v_k = \begin{bmatrix} a_{k1} & a_{k2} & a_{k3} & a_{k4} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \varepsilon_k, \quad (3.14)$$

onde:

$$\begin{cases} a_{k1} = i_k \\ a_{k2} = \frac{1}{2T} \left\{ i_{k+1} - i_{k-1} + K_L \left[ i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)} \right] \right\} \\ a_{k3} = \operatorname{sgn}(i_{0k}) \\ a_{k4} = i_{0k} \\ \mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} R & L & V_a & R_e \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (3.15)$$

em que os termos  $a_{k1}$ ,  $a_{k2}$ ,  $a_{k3}$  e  $a_{k4}$  são os coeficientes dependentes do tempo e  $\mathbf{x}^T = [R \ L \ V_a \ R_e]$  é o vetor dos parâmetros desconhecidos a serem determinados.

Escrevendo a expressão (3.14) para a  $k$ -ésima amostra, a seguinte matriz é obtida:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3.16)$$

onde  $\mathbf{v} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_N]^T$ ,  $\mathbf{A}$  é uma matriz de coeficientes  $N \times 4$  e  $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_N]^T$ .

O vetor dos parâmetros desconhecidos  $\mathbf{x}$  é obtido utilizando-se o MMQ, ou seja:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{v}, \quad (3.17)$$

em que a ordem da matriz  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ , que deve ser invertida, é  $n = 4$ .

Sendo o foco principal do trabalho de (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999) a detecção de faltas com formação de arco elétrico, a partir do valor estimado de  $V_a$  determina-se o tipo de falta com a seguinte lógica: se  $V_a = 0$ , a falta é permanente (sem arco elétrico), o que resulta na decisão de bloqueio do religador da linha; se  $V_a \neq 0$ , a falta é momentânea (com arco elétrico), conseqüentemente com a decisão de desbloqueio do religador.

Ainda que esse trabalho não trate especificamente do problema de LDFAI, seu pioneirismo assume relativa importância e, de certa forma, representa uma base para a técnica de LDFAI em linhas de transmissão apresentada nesta tese.

### 3.2.2 Proposta de RADOJEVIC, TERZIJA e DJURIC (2000)

A técnica de (RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000) é de fato uma extensão do trabalho de (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999), em que a distância da falta com formação de arco elétrico é um parâmetro a ser determinado.

Para entendimento da proposta de (RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000), considere os diagramas das Figuras 3.2 e 3.3 e os mesmos passos para obtenção da expressão (3.9), sendo esta reescrita da seguinte forma:

$$v = \left[ R i + \frac{X}{\omega_0} \frac{d}{dt} (i + K_L i_0) \right] l + V_a \operatorname{sgn} [i_0(t)] + (R_0 - R) l i_0 + R_a k_a i_0 + \varepsilon, \quad (3.18)$$

onde:  $K_L = (X_0 - X) / X$ ,  $i_a = k_a i_0$ , em que  $k_a$  é um coeficiente de proporcionalidade,  $\omega_0$  é a frequência angular fundamental do sistema,  $l$  é a distância da falta e  $\varepsilon$  é o termo que contém os erros de medição e de modelagem da linha e do arco. Ainda,  $R$  e  $X$  são a resistência e a reatância da linha e  $R_0$  e  $X_0$  são a resistência e a reatância de sequência zero da linha, todas por unidade de comprimento.

A expressão (3.18) é reescrita conforme:

$$v = \left[ R i + \frac{X}{\omega_0} \frac{d}{dt} (i + K_L i_0) \right] l + V_a \operatorname{sgn} [i_0(t)] + R_e i_0 + \varepsilon, \quad (3.19)$$

onde  $R_e = [(R_0 - R) l + k_a R_a]$ .

Da mesma maneira que a expressão (3.13), para a  $k$ -ésima amostra ( $k = 1, \dots, N$ ), tem-se que:

$$v_k = \left\{ R i_k + \frac{X}{2T \omega_0} \left[ i_{k+1} - i_{k-1} + K_L (i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)}) \right] \right\} l + V_a \operatorname{sgn} (i_{0k}) + R_e i_{0k} + \varepsilon_k. \quad (3.20)$$

A expressão (3.20) é reescrita de acordo com:

$$v_k = \begin{bmatrix} a_{k1} & a_{k2} & a_{k3} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \varepsilon_k, \quad (3.21)$$

onde:

$$\begin{cases} a_{k1} = R i_k + \frac{X}{2T \omega_0} \left[ i_{k+1} - i_{k-1} + K_L (i_{0(k+1)} - i_{0(k-1)}) \right] \\ a_{k2} = \operatorname{sgn} (i_{0k}) \\ a_{k3} = i_{0k} \\ \mathbf{x}^T = [l \quad V_a \quad R_e] \end{cases}, \quad (3.22)$$

em que os termos  $a_{k1}$ ,  $a_{k2}$  e  $a_{k3}$  são os coeficientes dependentes do tempo e  $\mathbf{x}^T = [l \quad V_a \quad R_e]$  é o vetor dos parâmetros desconhecidos a serem determinados.

Para a  $k$ -ésima amostra, a expressão (3.21) pode ser escrita da mesma forma que a (3.16) e resolvida segundo a expressão (3.17), sendo que agora a matriz ( $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ ), que deve ser invertida, possui ordem 3 ( $n = 3$ ).

Na proposta de (RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000) aplica-se a mesma lógica utilizada em (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999) para a determinação do tipo de falta (temporária ou permanente) e para o bloqueio ou desbloqueio do religador da linha. Como melhorias em relação ao trabalho anterior destacam-se a redução da ordem da matriz a ser invertida, de  $n = 4$  para  $n = 3$ , e a estimativa da distância da falta.

### 3.2.3 Proposta de LEE *et al.* (2006)

A proposta de (LEE *et al.*, 2006) apresenta um equacionamento empregando fasores sincronizados, obtidos por unidades de medições fasoriais sincronizadas (do inglês *Phasor Measurement Unit* - PMU) instaladas em ambos os terminais de uma linha de transmissão, para: estimar a distância da falta, reconhecer a formação de arco elétrico no ponto da falta e determinar a amplitude da tensão deste arco elétrico.

Para entendimento da proposta de (LEE *et al.*, 2006), considere a Figura 3.4, que ilustra o segmento de uma linha de transmissão sob falta fase-terra com ocorrência de arco elétrico, representado por três circuitos monofásicos de seqüências. Na Figura 3.4,  $D$  é o comprimento da linha e  $l$  a distância da falta. Os subscritos  $p$ ,  $n$  e 0 denotam as seqüências positiva, negativa e zero, respectivamente, e  $S$  e  $R$  indicam a barra local e remota, respectivamente. O sobre-escrito  $h$  descreve a ordem harmônica.

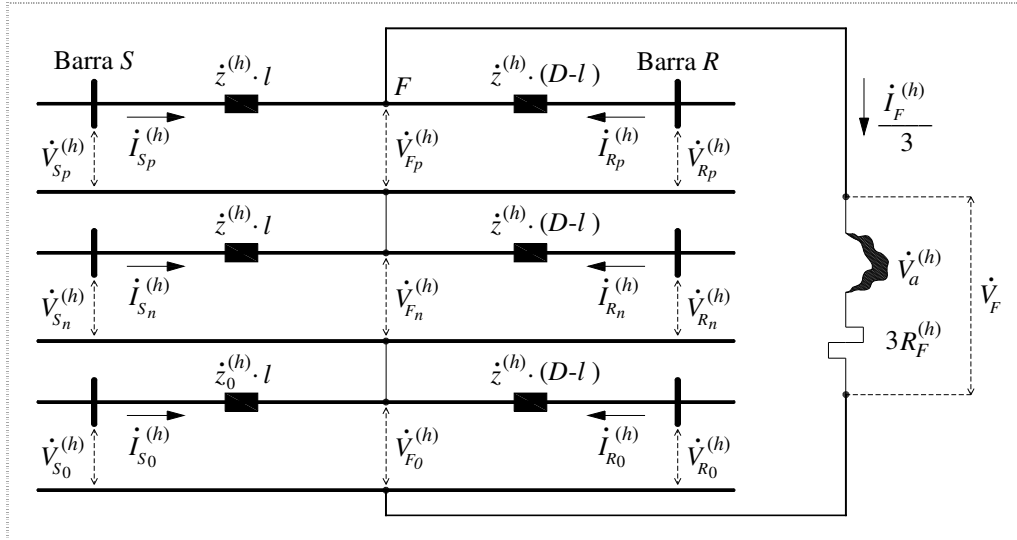


Figura 3.4 - Diagrama de seqüências de segmento de uma linha de transmissão sob falta.  
Fonte: (LEE *et al.*, 1999).

A partir dos diagramas de seqüências retratados na Figura 3.4, as seguintes equações são obtidas:

$$\dot{V}_{S_{p,n}}^{(h)} = \dot{z}^{(h)} l \dot{I}_{S_{p,n}}^{(h)} + \dot{V}_{F_{p,n}}^{(h)}, \quad (3.23)$$

$$\dot{V}_{S_0}^{(h)} = \dot{z}_0^{(h)} l \dot{I}_{S_0}^{(h)} + \dot{V}_{F_0}^{(h)}, \quad (3.24)$$

$$\dot{V}_{R_{p,n}}^{(h)} = \dot{z}^{(h)} (D-l) \dot{I}_{R_{p,n}}^{(h)} + \dot{V}_{F_{p,n}}^{(h)}, \quad (3.25)$$

$$\dot{V}_{R_0}^{(h)} = \dot{z}_0^{(h)} (D-l) \dot{I}_{R_0}^{(h)} + \dot{V}_{F_0}^{(h)}. \quad (3.26)$$

Onde:

$\dot{V}_{S_{p,n,0}}^{(h)}$ ,  $\dot{V}_{R_{p,n,0}}^{(h)}$  são as componentes de seqüências positiva, negativa e zero das tensões de fase da  $h$ -ésima harmônica em ambos os terminais da linha;

$\dot{I}_{S_{p,n,0}}^{(h)}$ ,  $\dot{I}_{R_{p,n,0}}^{(h)}$  são as componentes de seqüências positiva, negativa e zero das correntes de linha da  $h$ -ésima harmônica em ambos os terminais da linha;

$\dot{V}_{F_{p,n,0}}^{(h)}$  são as componentes de seqüências positiva, negativa e zero da tensão de fase faltosa da  $h$ -ésima harmônica no ponto da falta;

$\dot{z}^{(h)}$  são as impedâncias de seqüências positiva e negativa da linha para a  $h$ -ésima harmônica;

$\dot{z}_0^{(h)}$  é a impedância de seqüência zero da linha para a  $h$ -ésima harmônica.

Segundo as premissas do método de componentes simétricas, é possível escrever as seguintes equações:

$$\dot{V}_S^{(h)} = \dot{V}_{S_p}^{(h)} + \dot{V}_{S_n}^{(h)} + \dot{V}_{S_0}^{(h)}, \quad (3.27)$$

$$\dot{I}_S^{(h)} = \dot{I}_{S_p}^{(h)} + \dot{I}_{S_n}^{(h)} + \dot{I}_{S_0}^{(h)}, \quad (3.28)$$

$$\dot{V}_R^{(h)} = \dot{V}_{R_p}^{(h)} + \dot{V}_{R_n}^{(h)} + \dot{V}_{R_0}^{(h)}, \quad (3.29)$$

$$\dot{I}_R^{(h)} = \dot{I}_{R_p}^{(h)} + \dot{I}_{R_n}^{(h)} + \dot{I}_{R_0}^{(h)}, \quad (3.30)$$

$$\dot{V}_F^{(h)} = \dot{V}_{F_p}^{(h)} + \dot{V}_{F_n}^{(h)} + \dot{V}_{F_0}^{(h)}, \quad (3.31)$$

Substituindo as expressões (3.23) e (3.24) na equação (3.27), a tensão de fase do terminal local para a  $h$ -ésima harmônica é dada conforme:

$$\dot{V}_S^{(h)} = l \left( \dot{z}^{(h)} \dot{I}_{S_p}^{(h)} + \dot{z}^{(h)} \dot{I}_{S_n}^{(h)} + \dot{z}_0^{(h)} \dot{I}_{S_0}^{(h)} \right) + \dot{V}_F^{(h)}. \quad (3.32)$$

Considerando-se a seguinte manipulação algébrica:

$$\dot{V}_S^{(h)} = l \left( \dot{z}^{(h)} \dot{I}_{S_p}^{(h)} + \dot{z}^{(h)} \dot{I}_{S_n}^{(h)} + \dot{z}_0^{(h)} \dot{I}_{S_0}^{(h)} + \underbrace{\dot{z}^{(h)} \dot{I}_{S_0}^{(h)} - \dot{z}^{(h)} \dot{I}_{S_0}^{(h)}}_{=0} \right) + \dot{V}_F^{(h)}, \quad (3.33)$$

combinada com a expressão (3.28), a equação (3.32) é reescrita de acordo com:

$$\dot{V}_S^{(h)} = \dot{z}^{(h)} \left( \dot{I}_S^{(h)} + \frac{\dot{z}_0^{(h)}}{\dot{z}^{(h)}} \dot{I}_{S_0}^{(h)} - \dot{I}_{S_0}^{(h)} \right) l + \dot{V}_F^{(h)} \quad (3.34)$$

ou, de uma forma mais compacta, segundo:

$$\dot{V}_S^{(h)} = \dot{z}^{(h)} \left( \dot{I}_S^{(h)} + \dot{k}_z^{(h)} \dot{I}_{S_0}^{(h)} \right) l + \dot{V}_F^{(h)}, \quad (3.35)$$

onde  $\dot{k}_z^{(h)} = (\dot{z}_0^{(h)} - \dot{z}^{(h)}) / \dot{z}^{(h)}$  é um fator de compensação de seqüência zero.

De forma similar à expressão (3.35), a tensão de fase do terminal remoto para a  $h$ -ésima harmônica é obtida conforme:

$$\dot{V}_R^{(h)} = \dot{z}^{(h)} \left( \dot{I}_R^{(h)} + \dot{k}_z^{(h)} \dot{I}_{R_0}^{(h)} \right) (D - l) + \dot{V}_F^{(h)}. \quad (3.36)$$

Subtraindo a expressão (3.36) da (3.35) e considerando-se a 1ª harmônica, a distância da falta em relação ao terminal local é dada por:

$$l = \frac{\dot{V}_S^{(1)} - \dot{V}_R^{(1)} + \dot{z}^{(1)} \left( \dot{I}_R^{(1)} + \dot{k}_z^{(1)} \dot{I}_{R_0}^{(1)} \right) D}{\dot{z}^{(1)} \left[ \dot{I}_S^{(1)} + \dot{I}_R^{(1)} + \dot{k}_z^{(1)} \left( \dot{I}_{S_0}^{(1)} + \dot{I}_{R_0}^{(1)} \right) \right]}. \quad (3.37)$$

Após o cálculo da distância da falta, usando a expressão (3.37), a tensão no ponto da falta, para a 3ª harmônica, é determinada a partir da equação (3.35). Conforme é mostrado na Figura 3.4, a resistência de falta  $R_F$  é dada segundo:

$$R_F = \frac{\dot{V}_F^{(3)} - \dot{k}^{(3)} V_a}{\dot{I}_F^{(3)}}, \quad (3.38)$$

onde:  $\dot{k}^{(3)} = 0,393 \angle 3\varphi_1$  é o coeficiente da terceira harmônica e  $\varphi_1$  é o ângulo de fase da 1ª harmônica da corrente de falta ( $\dot{I}_{F1} = I_{F1} \angle \varphi_1$ ).

Considerando que a resistência de falta  $R_F$  é uma grandeza escalar, a expressão (3.38) é reescrita de acordo com:

$$\Im \{ R_F \} = \Im \left\{ \frac{\dot{V}_F^{(3)} - \dot{k}^{(3)} V_a}{\dot{I}_F^{(3)}} \right\} = 0. \quad (3.39)$$

onde  $\Im \{ \cdot \}$  denota a parte imaginária de um número complexo. Desta forma, a amplitude da tensão do arco elétrico é determinada por:

$$V_a = \frac{\Im \{ \dot{V}_F^{(3)} / \dot{I}_F^{(3)} \}}{\Im \{ \dot{k}^{(3)} / \dot{I}_F^{(3)} \}}. \quad (3.40)$$

De forma semelhante ao que fora descrito no trabalho de (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999), a partir do valor estimado de  $V_a$  é possível determinar o tipo de falta, se permanente ( $V_a = 0$ , sem arco elétrico) ou se momentânea ( $V_a \neq 0$ , com arco elétrico).

### 3.2.4 Proposta de RADOJEVIC e SHIN (2006)

O trabalho de (RADOJEVIC; SHIN, 2006) apresenta um equacionamento no domínio da frequência para estimativa da distância da falta e reconhecimento da formação de arco considerando faltas fase-terra em linhas de transmissão. O desenvolvimento elaborado a seguir descreve a proposta de (RADOJEVIC; SHIN, 2006).

Considere o modelo de falta com formação de arco elétrico mostrado na Figura 3.5, no domínio do tempo, Figura 3.5(a), e no domínio da frequência, Figura 3.5(b), respectivamente. Segundo a Figura 3.5(a), a tensão no ponto da falta é dada, no domínio do tempo, conforme:

$$v_F(t) = v_a(t) + R_F i_F(t), \quad (3.41)$$

onde  $v_a$  é a tensão de arco da falta,  $R_F$  é a resistência de falta e  $i_F$  é a corrente de falta ou corrente de arco.

De acordo com (RADOJEVIC; SHIN, 2006), a tensão de arco da falta pode ser representada por uma série de Fourier contendo somente componentes ímpares, segundo:

$$v_a(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_{ah}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} k_h V_a \text{sen}(h\omega_0 t), \quad (3.42)$$

onde  $h = 1, 3, 5, 7, \dots$  é a ordem harmônica,  $v_{ah}$  é a tensão de arco da falta para a  $h$ -ésima ordem harmônica,  $\omega_0$  é a frequência fundamental e  $k_h$  é um coeficiente da  $h$ -ésima ordem harmônica.

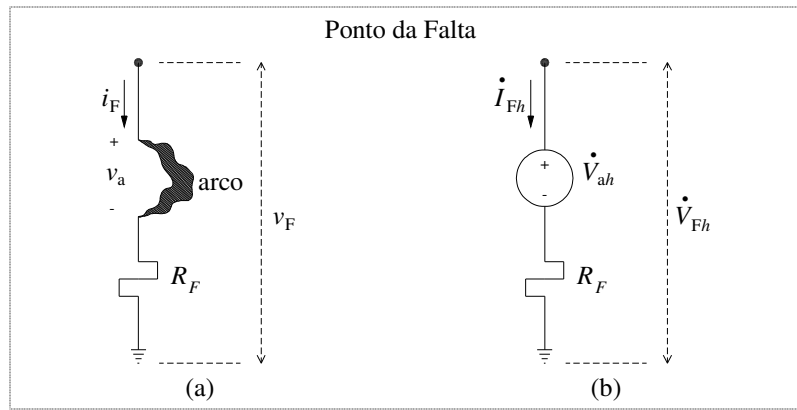


Figura 3.5 - Modelo de falta com arco elétrico.  
Fonte: (RADOJEVIC; SHIN, 2006).

Considerando a representação descrita na expressão (3.42) e a Figura 3.5(b), a expressão (3.41) é reescrita, no domínio da frequência, como:

$$\dot{V}_{Fh} = \dot{V}_{ah} + R_F \dot{I}_{Fh}. \quad (3.43)$$

Segundo (RADOJEVIC; SHIN, 2006), na abordagem proposta, a tensão de arco está em fase com a corrente de falta, desta forma, as tensões de arco da falta no domínio da frequência, para a 1ª e 3ª ordens harmônicas, são dadas pelas seguintes expressões:

$$\dot{V}_{a1} = \dot{k}_1 V_a, \quad (3.44)$$

$$\dot{V}_{a3} = \dot{k}_3 V_a, \quad (3.45)$$

onde:

$\dot{k}_1 = 1,230 \angle \varphi_1$  é o coeficiente da primeira harmônica;

$\dot{k}_3 = 0,393 \angle 3\varphi_1$  é o coeficiente da terceira harmônica;

$\varphi_1$  é o ângulo de fase da 1ª harmônica da corrente de falta ( $\dot{I}_{F1} = I_{F1} \angle \varphi_1$ ).

Para uma falta fase-terra em uma linha de transmissão, com formação de arco elétrico, considere o segmento de linha mostrado na Figura 3.6, em que o modelo de falta apresentado na Figura 3.5(b) é adotado. Os diagramas de seqüências do segmento de linha da Figura 3.6 são representados na Figura 3.7.

A partir dos diagramas de seqüências mostrados na Figura 3.7 é possível escrever as seguintes equações:

$$\dot{V}_{h-p} = \dot{z}_h l \dot{I}_{h-p} + \dot{V}_{Fh-p}, \quad (3.46)$$

$$\dot{V}_{h-n} = \dot{z}_h l \dot{I}_{h-n} + \dot{V}_{Fh-n}, \quad (3.47)$$

$$\dot{V}_{h-0} = \dot{z}_h l \dot{I}_{h-0} + \dot{V}_{Fh-0}. \quad (3.48)$$

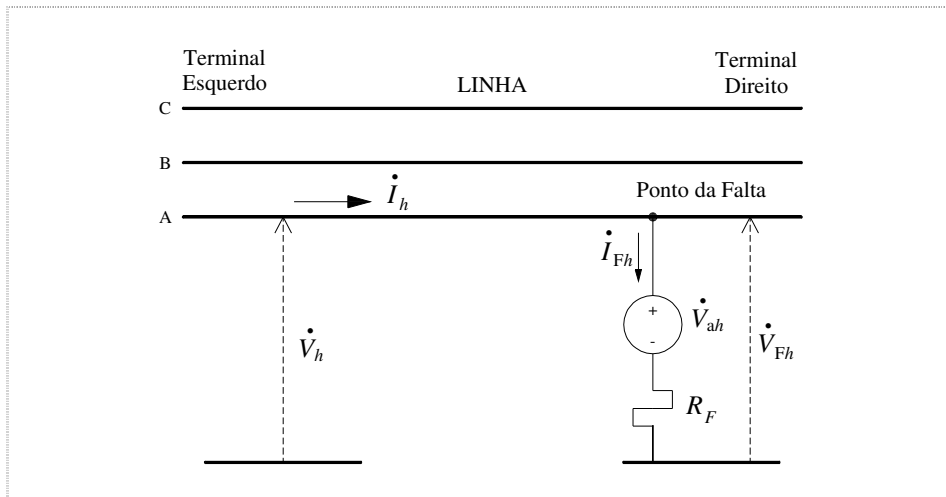


Figura 3.6 - Segmento de uma linha de transmissão sob falta fase-terra com arco elétrico.  
Fonte: (RADOJEVIC; SHIN, 2006).

A partir da aplicação das propriedades do método de componentes simétricas e de manipulações algébricas, que seguem o mesmo raciocínio para a obtenção da expressão (3.35), realizadas nas expressões (3.46), (3.47) e (3.48), determina-se que:

$$\dot{V}_h = \dot{z}_h (\dot{I}_h + \dot{k}_{zh} \dot{I}_{h0}) l + \dot{V}_{Fh}, \quad (3.49)$$

onde  $\dot{k}_{zh} = (\dot{z}_{0h} - \dot{z}_h) / \dot{z}_h$  é um fator de compensação de seqüência zero.

Substituindo a expressão (3.43) na (3.49) e usando as relações das expressões (3.44) e (3.45), é possível escrever para a 1ª e 3ª ordens harmônicas as seguintes relações:

$$\dot{V}_1 = \dot{z}_1 (\dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10}) l + \dot{k}_1 \dot{V}_a + \dot{R}_F \dot{I}_{F1}, \quad (3.50)$$

$$\dot{V}_3 = \dot{z}_3 (\dot{I}_3 + \dot{k}_{z3} \dot{I}_{30}) l + \dot{k}_3 \dot{V}_a + \dot{R}_F \dot{I}_{F3}. \quad (3.51)$$



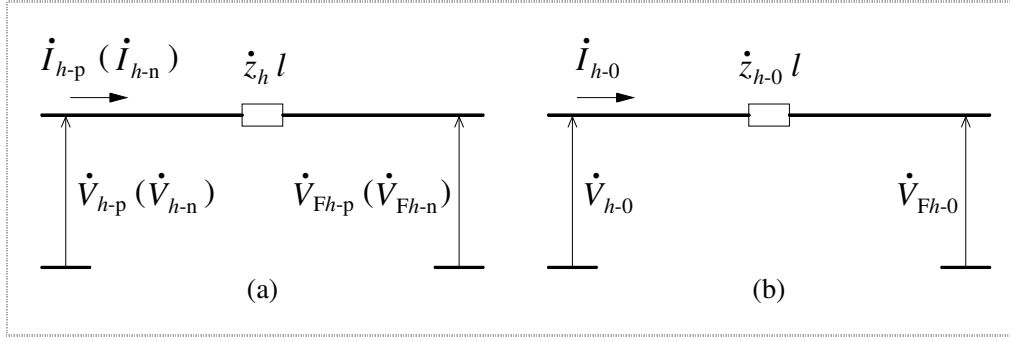


Figura 3.7 - Componentes de seqüências do segmento de linha da Figura 3.6.  
Fonte: (RADOJEVIC; SHIN, 2006)

Assumindo que as correntes de seqüência zero dos terminais esquerdo (local) e direito (remoto) estão em fase, a corrente de falta, para a 1ª e 3ª ordens harmônicas, é dada por:

$$\dot{I}_{F1} = 3\dot{I}_{F10} = 3C_{F1}\dot{I}_{10}, \quad (3.52)$$

$$\dot{I}_{F3} = 3\dot{I}_{F30} = 3C_{F3}\dot{I}_{30}, \quad (3.53)$$

onde  $C_{F1}$  e  $C_{F3}$  são coeficientes de proporcionalidade.

Usando a condição assumida nas expressões (3.52) e (3.53), as expressões (3.50) e (3.51) são reescritas conforme:

$$\dot{V}_1 = \dot{z}_1 (\dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10}) l + \dot{k}_1 V_a + 3R_{Fe1} \dot{I}_{10}, \quad (3.54)$$

$$\dot{V}_3 = \dot{z}_3 (\dot{I}_3 + \dot{k}_{z3} \dot{I}_{30}) l + \dot{k}_3 V_a + 3R_{Fe3} \dot{I}_{30}, \quad (3.55)$$

onde  $R_{Fe1} = C_{F1} R_F$  e  $R_{Fe3} = C_{F3} R_F$ .

A divisão das expressões (3.54) e (3.55) nas suas partes reais e imaginárias resulta nas seguintes equações:

$$\Re\{\dot{V}_1\} = \Re\{\dot{z}_1 (\dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10})\} l + \Re\{\dot{k}_1\} V_a + 3\Re\{\dot{I}_{10}\} R_{Fe1}, \quad (3.56)$$

$$\Im\{\dot{V}_1\} = \Im\{\dot{z}_1 (\dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10})\} l + \Im\{\dot{k}_1\} V_a + 3\Im\{\dot{I}_{10}\} R_{Fe1}, \quad (3.57)$$

$$\Re\{\dot{V}_3\} = \Re\{\dot{z}_3 (\dot{I}_3 + \dot{k}_{z3} \dot{I}_{30})\} l + \Re\{\dot{k}_3\} V_a + 3\Re\{\dot{I}_{30}\} R_{Fe3}, \quad (3.58)$$

$$\Im\{\dot{V}_3\} = \Im\{\dot{z}_3 (\dot{I}_3 + \dot{k}_{z3} \dot{I}_{30})\} l + \Im\{\dot{k}_3\} V_a + 3\Im\{\dot{I}_{30}\} R_{Fe3}, \quad (3.59)$$

onde  $\Re\{\cdot\}$  e  $\Im\{\cdot\}$  denotam a parte real e imaginária de um número complexo.

Desta forma, a partir do sistema de quatro equações formado pelas expressões (3.56), (3.57), (3.58) e (3.59) estimam-se os quatro parâmetros desconhecidos, ou seja, a distância da falta  $l$ , a amplitude da tensão de arco  $V_a$ ,  $R_{Fe1}$  e  $R_{Fe3}$ . Novamente, o valor estimado de  $V_a$  é utilizado para determinar o tipo de falta, momentânea ou permanente.

### 3.2.5 Proposta de RADOJEVIC (2007)

O trabalho de (RADOJEVIC, 2007) é uma extensão da proposta apresentada em (RADOJEVIC; SHIN, 2006), utilizando o mesmo modelo de falta com arco elétrico mostrado na Figura 3.5, os mesmos diagramas apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7 e a mesma notação matemática. A principal contribuição são as condições de contorno empregadas para reduzir o número de equações a serem utilizadas para a estimativa da distância da falta.

Para entendimento da proposta de (RADOJEVIC, 2007), considere a expressão escrita a seguir para a harmônica de primeira ordem, que resulta da substituição da expressão (3.43) na (3.49), conforme:

$$\dot{V}_1 = \dot{z}_1 \left( \dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10} \right) l + \dot{V}_{a1} + R_F \dot{I}_{F1}. \quad (3.60)$$

A expressão (3.60) é reescrita de acordo com:

$$\dot{V}_1 = \dot{z}_1 \left( \dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10} \right) l + R_{a1} \dot{I}_{F1} + R_F \dot{I}_{F1}, \quad (3.61)$$

onde  $R_{a1}$  é a resistência de arco para a harmônica de primeira ordem.

Usando a condição assumida na expressão (3.52), a expressão (3.61) é reescrita como:

$$\dot{V}_1 = \dot{z}_1 \left( \dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10} \right) l + R_{Fe1} \dot{I}_{10}, \quad (3.62)$$

onde  $R_{Fe1} = 3C_{F1} (R_{a1} + R_F)$ . A divisão da expressão (3.62) nas suas partes real e imaginária resulta nas seguintes equações:

$$\Re\{\dot{V}_1\} = \Re\left\{\dot{z}_1 \left( \dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10} \right)\right\} l + \Re\{\dot{I}_{10}\} R_{Fe1}, \quad (3.63)$$

$$\Im\{\dot{V}_1\} = \Im\left\{\dot{z}_1 \left( \dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10} \right)\right\} l + \Im\{\dot{I}_{10}\} R_{Fe1}. \quad (3.64)$$

A partir das expressões (3.63) e (3.64), a distância da falta é estimada conforme:

$$l = \frac{\Re\{\dot{V}_1\} \Im\{\dot{I}_{10}\} - \Im\{\dot{V}_1\} \Re\{\dot{I}_{10}\}}{\Re\left\{\dot{z}_1 \left( \dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10} \right)\right\} \Im\{\dot{I}_{10}\} - \Re\{\dot{I}_{10}\} \Im\left\{\dot{z}_1 \left( \dot{I}_1 + \dot{k}_{z1} \dot{I}_{10} \right)\right\}}. \quad (3.65)$$

Desta forma, a expressão (3.65) determina a localização de faltas fase-terra com formação de arco elétrico empregando as grandezas de componentes simétricas das correntes e tensões do terminal local.

### 3.2.6 Proposta de IBRAHIM *et al.* (2010)

Em (IBRAHIM *et al.*, 2010) é proposta uma técnica de LDFAI para linhas de transmissão com dados não sincronizados de ambos os terminais. No equacionamento apresentado,

para a localização de faltas fase-terra, são empregadas as componentes de sequência zero do SEP analisado e, para faltas fase-fase, as componentes de sequência negativa. Para entendimento da técnica de (IBRAHIM *et al.*, 2010), considere o diagrama do SEP sob falta descrito na Figura 3.8.

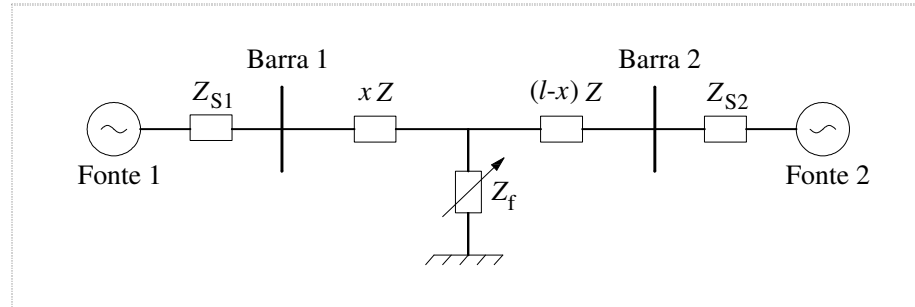


Figura 3.8 - Linha de transmissão sob falta.  
Fonte: (IBRAHIM *et al.*, 2010)

Na Figura 3.8,  $Z_{S1}$  e  $Z_{S2}$  são as impedâncias dos sistemas equivalentes das barras 1 e 2, respectivamente,  $Z$  é a impedância da linha,  $l$  é o comprimento da linha e  $x$  é a distância da falta em relação à barra 1.

A Figura 3.9 apresenta os diagramas de sequência zero e negativa do SEP retratado na Figura 3.8. As Figuras 3.9(a) e 3.9(b) retratam os diagramas de seqüências zero e negativa, respectivamente. Em que  $Z_{S10}$ ,  $Z_{S12}$ ,  $Z_{S20}$  e  $Z_{S22}$  são as impedâncias de seqüência zero e negativa dos sistemas equivalentes das barras 1 e 2, respectivamente;  $I_{10}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{20}$  e  $I_{22}$  são as correntes de seqüência zero e negativa dos terminais local (barra 1) e remoto (barra 2), respectivamente;  $Z_0$  e  $Z_2$  são as impedâncias de seqüência zero e negativa da linha de transmissão, respectivamente;  $I_0$  e  $I_2$  são as componentes de seqüência zero e negativa da corrente de falta, respectivamente.

A aplicação das leis de Kirchhoff no diagrama da Figura 3.9(a) resulta em:

$$I_{10} (x Z_0 + Z_{S10}) = I_{20} [(l-x) Z_0 + Z_{S20}]. \quad (3.66)$$

Isolando-se  $x$  na expressão (3.66), a localização de faltas fase-terra, em relação à barra 1, é obtida segundo:

$$x = \frac{I_{20} Z_{S20} + I_{20} l Z_0 - I_{10} Z_{S10}}{Z_0 (I_{10} + I_{20})}. \quad (3.67)$$

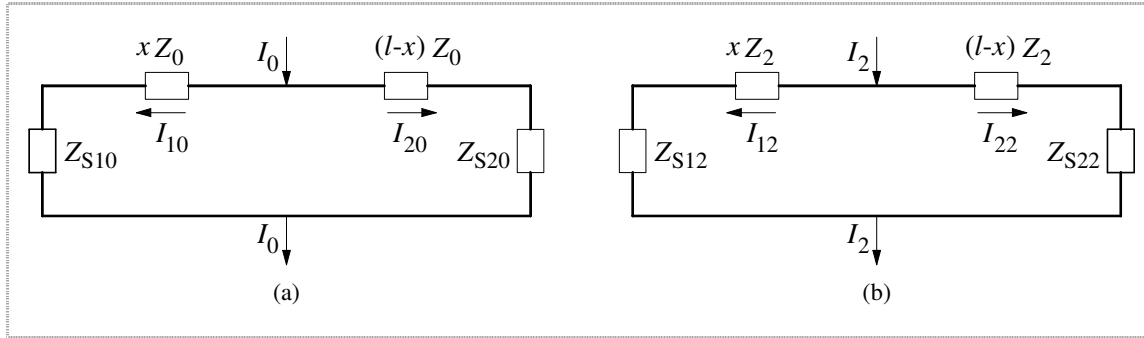


Figura 3.9 - Diagramas de seqüências do sistema da Figura 3.8.  
Fonte: (IBRAHIM *et al.*, 2010)

De forma semelhante, a utilização das leis Kirchhoff no diagrama da Figura 3.9(b) resulta em:

$$I_{12}(xZ_2 + Z_{S12}) = I_{22}[(l-x)Z_2 + Z_{S22}]. \quad (3.68)$$

Isolando-se  $x$  na expressão (3.68), a localização de faltas fase-fase, em relação à barra 1, é determinada segundo:

$$x = \frac{I_{22}Z_{S22} + I_{22}lZ_2 - I_{12}Z_{S12}}{Z_2(I_{12} + I_{22})}. \quad (3.69)$$

Conforme descrevem as expressões (3.67) e (3.69), a determinação da distância da falta requer a estimativa dos fasores de seqüências zero e negativa das correntes a partir dos sinais registrados nos terminais local e remoto. Na técnica proposta por (IBRAHIM *et al.*, 2010), tais fasores são estimados no período de regime permanente da falta por meio da transformada discreta de Fourier (do inglês *Discrete Fourier Transform* - DFT).

### 3.2.7 Proposta de AHSAAE (2013)

O trabalho de (AHSAAE, 2013) apresenta uma técnica de LDFAI para linhas de transmissão com dados de tensões e correntes não sincronizados, em que a linha é modelada por parâmetros distribuídos no domínio do tempo. A ideia consiste basicamente na minimização de uma função objetivo cujas variáveis são a distância da falta e o tempo de sincronização dos dados obtidos nos terminais local e remoto.

Para facilitar a compreensão da proposta de (AHSAAE, 2013), na Figura 3.10 é apresentado o diagrama de uma linha de transmissão monofásica sob falta, modelada por parâmetros distribuídos. Na Figura 3.10, S1 e S2 são os terminais local e remoto, respectivamente;  $i_{S1}$ ,  $v_{S1}$ ,  $i_{S2}$  e  $v_{S2}$  são as correntes e tensões nos terminais local e remoto, respectivamente;  $v_{SF1}$ ,  $i_{SF1}$ ,  $v_{SF2}$  e  $i_{SF2}$  são as tensões e correntes à esquerda e à direita do ponto da FAI, respectivamente;  $x$  é a distância da falta.

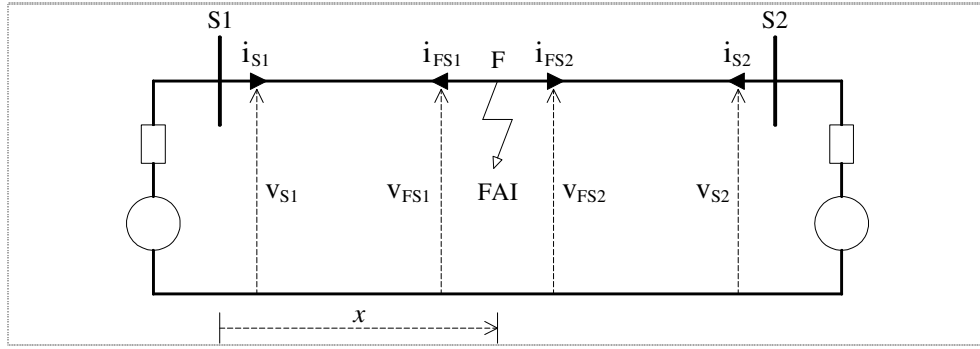


Figura 3.10 - Diagrama de uma linha monofásica com parâmetros distribuídos.  
Fonte: (AHSAAE, 2013)

De acordo com (AHSAAE, 2013), utilizando a notação da Figura 3.10, pode-se escrever para a tensão à esquerda do ponto da falta que:

$$\begin{aligned}
 v_{FS1}(t) = & \left( Z + \frac{Rx}{4} \right)^2 \left[ v_{S1} \left( t + t_0 + \frac{x}{c} \right) - \left( Z + \frac{Rx}{4} \right) i_{S1} \left( t + t_0 + \frac{x}{c} \right) \right] + \\
 & \left( Z - \frac{Rx}{4} \right)^2 \left[ v_{S1} \left( t + t_0 - \frac{x}{c} \right) + \left( Z - \frac{Rx}{4} \right) i_{S1} \left( t + t_0 - \frac{x}{c} \right) \right] - \\
 & \frac{\left( Z + \frac{Rx}{4} \right) R}{4} \left[ \frac{\frac{R/2}{\left( Z + \frac{Rx}{4} \right)} v_{S1} (t + t_0) + 2 \left( Z - \frac{Rx}{4} \right) i_{S1} (t + t_0)}{2Z^2} \right].
 \end{aligned} \tag{3.70}$$

De forma similar, pode-se escrever para a tensão à direita do ponto da falta que:

$$\begin{aligned}
 v_{FS2}(t) = & \left( Z + \frac{R(l-x)}{4} \right)^2 \left[ v_{S2} \left( t + \frac{l-x}{c} \right) - \left( Z + \frac{R(l-x)}{4} \right) i_{S2} \left( t + \frac{l-x}{c} \right) \right] + \\
 & \left( Z - \frac{R(l-x)}{4} \right)^2 \left[ v_{S2} \left( t - \frac{l-x}{c} \right) + \left( Z - \frac{R(l-x)}{4} \right) i_{S2} \left( t - \frac{l-x}{c} \right) \right] - \\
 & \frac{\left( Z + \frac{R(l-x)}{4} \right) R}{4} \left[ \frac{\frac{R/2}{\left( Z + \frac{R(l-x)}{4} \right)} v_{S2} (t) + 2 \left( Z - \frac{R(l-x)}{4} \right) i_{S2} (t)}{2Z^2} \right].
 \end{aligned} \tag{3.71}$$

Nas expressões (3.70) e (3.71) tem-se que:  $Z$  é a impedância característica da linha,  $R$  é a resistência da linha por unidade de comprimento,  $x$  é a distância da falta em relação à barra local,  $c$  é a velocidade de propagação da onda viajante gerada pelo transitório da falta,  $l$  é o

comprimento total da linha de transmissão e  $t_0$  é o tempo de sincronização dos dados obtidos nos terminais local e remoto.

Considerando que as tensões à esquerda e à direita do ponto da falta são iguais, devido a continuidade da linha, resulta que:

$$v_{FS1}(t) - v_{FS2}(t) = 0. \quad (3.72)$$

Substituindo as expressões (3.70) e (3.71) na (3.72), a seguinte equação é obtida no domínio do tempo:

$$f(v_{S1}, i_{S1}, v_{S2}, i_{S2}, t, x, t_0) = 0 \quad (3.73)$$

A expressão (3.73) pode ser discretizada e reescrita conforme:

$$f(v_{S1}, i_{S1}, v_{S2}, i_{S2}, n, x, t_0) = 0, \quad (3.74)$$

onde  $t = n \Delta t$ ,  $n$  é um número arbitrário e  $\Delta t$  é o passo de amostragem.

A partir da expressão (3.74),  $N$  equações de duas variáveis são obtidas, onde  $N$  é o número de amostras da janela de dados considerada. A estimativa das variáveis desconhecidas  $x$  e  $t_0$  resulta da solução do seguinte problema de otimização:

$$\begin{cases} \text{Min } J_f(x, t_0) = \text{Min}_{x, t_0} \sum_{n=1}^N f^2(v_{S1}, i_{S1}, v_{S2}, i_{S2}, n, x, t_0) \\ \text{Sujeito a : } \begin{cases} 0 < x < L \\ t_{0-\text{min}} < t_0 < t_{0-\text{máx}} \end{cases} \end{cases}, \quad (3.75)$$

onde  $t_{0-\text{min}}$  e  $t_{0-\text{máx}}$  são os limites inferior e superior do tempo de sincronização dos dados obtidos nos terminais local e remoto, respectivamente.

A partir da expressão (3.75), que resulta da abordagem para uma linha de transmissão monofásica, é apresentada a generalização para sistemas trifásicos, com linhas de transmissão representadas no domínio modal<sup>11</sup>.

### 3.3 OBSERVAÇÕES E PONDERAÇÕES SOBRE AS PROPOSTAS EXISTENTES

Todos os trabalhos apresentados nesta revisão bibliográfica contribuíram de forma muito significativa para o desenvolvimento das técnicas de LDFAI, desta forma, esta subseção tem por único objetivo identificar os aspectos relevantes para a fundamentação da técnica proposta nesta tese.

<sup>11</sup> No domínio modal, uma linha polifásica de  $n$  fases pode ser separada em seus  $n$  modos de propagação e cada um destes modos comporta-se como uma linha monofásica e, desta forma, o acoplamento entre as fases da linha é eliminado (KUROKAWA *et al.*, 2007).

Em relação aos trabalhos propostos por (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999), (RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000), (LEE *et al.*, 2006), (RADOJEVIC; SHIN, 2006) e (RADOJEVIC, 2007), estes apresentam técnicas para a LDFAI em linhas de transmissão, no domínio do tempo ou da frequência, fundamentadas em um modelo de falta que descreve unicamente a formação do arco elétrico no ponto da falta. Entretanto, as FAI caracterizam-se também pela presença de *buildup*, *shoulder*, não-linearidades e assimetrias na forma de onda da corrente de falta (NAM *et al.*, 2001) e, também, pela presença principalmente das harmônicas de segunda e terceira ordens (EMANUEL *et al.*, 1990). Assim, a utilização de um modelo de FAI com tais características permite a representação mais real dos eventos que envolvem este tipo de falta. Segundo (DUGAN *et al.*, 1996), a energização de transformadores é um processo que dá origem a harmônicas de 3ª ordem na rede elétrica, desta forma uma limitação do trabalho de (RADOJEVIC; SHIN, 2006) pode ser a dificuldade na discriminação entre harmônicas produzidas por uma falta com arco elétrico e a energização de um transformador.

Em relação aos trabalhos apresentados por (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999), (RADOJEVIC; TERZIJA; DJURIC, 2000), (LEE *et al.*, 2006), (RADOJEVIC; SHIN, 2006), (RADOJEVIC, 2007) e (IBRAHIM *et al.*, 2010), estes propõem técnicas para a LDFAI em linhas de transmissão, sendo estas representadas por matrizes de impedâncias em componentes simétricas com elementos nulos fora da diagonal principal. Tal representação significa na prática a consideração de uma linha de transmissão idealmente e completamente transposta (ZANETTA JR, 2005). O Quadro 3.2 apresenta as estruturas das matrizes de impedâncias em componentes de fase e componentes simétricas (BERMAN; XU, 1998). A matriz tipo I é a representação matemática de uma linha de transmissão transposta, já a matriz tipo II representa uma linha de transmissão não transposta. Desta forma, representar uma linha não transposta por uma matriz tipo I, em componentes simétricas, resultará em erros para as condições em que a linha não seja completamente transposta ou para uma condição de falta entre um dos trechos de transposição da linha.

Em relação ao trabalho de (IBRAHIM *et al.*, 2010), os autores afirmam que a técnica de LDFAI proposta utiliza dados de um terminal, mas a corrente no terminal remoto é considerada conhecida, o que na verdade constitui uma técnica a dois terminais. Assim sendo, está implícito que o sistema equivalente visto da barra do terminal remoto da linha é conhecido. Além disso, observa-se nas expressões (3.67) e (3.69) que a estimativa da distância da falta é diretamente relacionada com os valores das impedâncias equivalentes dos terminais local e remoto. Contudo, em decorrência de manobras realizadas e alterações das cargas do

SEP sob análise, as impedâncias equivalentes não são grandezas de valores constantes e de fácil obtenção, particularmente em SEP de maior complexidade e dimensão. Outra observação em relação à proposta de (IBRAHIM *et al.*, 2010) é que os fasores empregados nas formulações desenvolvidas são estimados no período de regime permanente da falta. Desta forma, tal abordagem precisa ser validada para condições de faltas momentâneas ou condições em que a linha de transmissão é desenergizada antes que a falta atinja um período estável.

Quadro 3.2 - Estruturas das matrizes de impedâncias.

Matriz Tipo	Componentes de Fase			Componentes Simétricas		
<b>I</b>	$Z_p$	$Z_m$	$Z_m$	$Z_0$	0	0
	$Z_m$	$Z_p$	$Z_m$	0	$Z_1$	0
	$Z_m$	$Z_m$	$Z_p$	0	0	$Z_1$
<b>II</b>	$Z_{aa}$	$Z_{ab}$	$Z_{ac}$	$Z_{00}$	$Z_{01}$	$Z_{02}$
	$Z_{ab}$	$Z_{bb}$	$Z_{bc}$	$Z_{01}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$
	$Z_{ac}$	$Z_{bc}$	$Z_{cc}$	$Z_{02}$	$Z_{12}$	$Z_{22}$

Fonte: (BERMAN; XU, 1998).

Finalmente, em relação ao trabalho de (AHSAAE, 2013), a técnica proposta está fundamentada na consideração de que as tensões à montante e à jusante do ponto da falta são iguais. Contudo, tal proposta necessita ser validada para uma condição de falta em que tais tensões não sejam iguais como, por exemplo, na situação em que uma extremidade de um cabo rompido toca o solo e a outra extremidade permanece suspensa. Observa-se ainda que a velocidade de propagação da onda viajante é considerada constante nas equações que determinam as tensões à montante e à jusante do ponto da falta. Entretanto, segundo (LIN *et al.*, 2012), esta velocidade é difícil de ser determinada, pois tais ondas viajantes são constituídas de várias componentes de frequência, sendo que cada componente possui diferente velocidade de propagação.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, as técnicas de LDFAI em linhas de transmissão, baseadas na impedância aparente, foram formalizadas por meio de uma revisão bibliográfica, considerando-se as publicações mais relevantes. Dado que as técnicas de LDF para faltas puramente resistivas estão sólida e amplamente determinadas na literatura existente e que tais faltas são casos particulares de FAI para condições específicas, os escassos 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 se verificar que 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, a técnica de LDFAI em linhas de transmissão proposta nesta tese, baseada no método da impedância aparente, é apresentada no Capítulo seguinte.



## **4 DESENVOLVIMENTO PROPOSTO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO: FORMULAÇÃO BASEADA NO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA APARENTE**

O Capítulo 3 apresentou a revisão bibliográfica das técnicas existentes para localização de faltas de alta impedância em linhas de transmissão, em que se observou a escassez de publicações sobre este assunto. Independentemente se desenvolvidas no domínio do tempo ou da frequência, tais técnicas revelam um significativo avanço nos estudos de LDFAI. Contudo, algumas considerações ainda precisam ser feitas, lacunas a serem preenchidas e contribuições a serem dadas no campo da LDFAI. Assim sendo, neste Capítulo é apresentada uma nova técnica de LDFAI aplicada a linhas de transmissão curtas que considera entre outros aspectos a representação do SEP em componentes de fase, o modelo da FAI com uma resistência que varia com o tempo (considerando distintas superfícies de contato), a aplicação em linhas de transmissão simples e paralelas e aplicabilidade em casos reais. A técnica proposta nesta tese é inspirada no trabalho de (DJURIC; RADOJEVIC; TERZIJA, 1999), considerando-se, evidentemente, importantes avanços no estado da arte.

### **4.1 PROPOSIÇÃO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: ABORDAGEM PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO MONOFÁSICAS**

Por questões de simplicidade, a técnica de LDFAI proposta é apresentada para uma linha de transmissão monofásica com ocorrência de FAI Fase-Terra (FAI-FT). Em seguida, apresenta-se a extensão para linhas de transmissão trifásicas e demais tipos de faltas à terra.

#### **4.1.1 Linha de Transmissão Monofásica Simples sob Falta**

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de uma linha de transmissão monofásica com ocorrência de uma FAI no ponto F, em que as Barras L e R denominam-se barras local e remota, respectivamente.

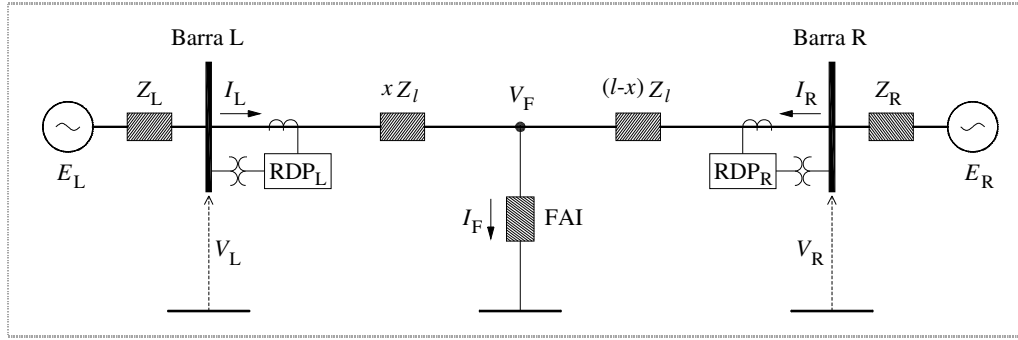


Figura 4.1 - Linha de transmissão monofásica sob falha.  
Fonte: O autor (2014).

As notações mostradas na Figura 4.1 são assim definidas:

- $E_L$  fonte equivalente da barra local [V];
- $E_R$  fonte equivalente da barra remota [V];
- $V_L$  tensão de fase da barra local [V];
- $V_R$  tensão de fase da barra remota [V];
- $V_F$  tensão no ponto da falha [V];
- $I_L$  corrente de linha da barra local [A];
- $I_R$  corrente de linha da barra remota [A];
- $I_F$  corrente de falha [A];
- $Z_l$  impedância da linha de transmissão [ $\Omega/\text{km}$ ];
- $Z_L$  impedância equivalente da barra local [ $\Omega$ ];
- $Z_R$  impedância equivalente da barra remota [ $\Omega$ ];
- $x$  distância da falha em relação à barra local [km];
- $l$  comprimento total da linha de transmissão [km];
- RDP<sup>12</sup> registrador digital de perturbação.

A aplicação das leis de Kirchhoff no diagrama da Figura 4.1 resulta, em notação fasorial, que:

$$V_R - V_L + x Z_l I_L - (l - x) Z_l I_R = 0. \quad (4.1)$$

A expressão (4.1) pode ser reescrita como:

$$\left[ Z_l (I_L + I_R) \right] x = V_L - V_R + l Z_l I_R. \quad (4.2)$$

<sup>12</sup> Neste trabalho consideram-se somente os Registradores Digitais de Falhas (RDF) ou Relés de Proteção (RP).

Como a distância da falta deve ser um número real positivo, com  $x \in \mathfrak{R}_+$ , a expressão (4.2) é resolvida conforme:

$$x = \frac{|V_L - V_R + l Z_l I_R|}{|Z_l (I_L + I_R)|}. \quad (4.3)$$

Observa-se na expressão (4.3) que a distância da falta  $x$  é a razão entre dois números reais. Isto implica que somente um fasor de tensão e corrente dos sinais obtidos nos terminais local e remoto ( $V_L$ ,  $V_R$ ,  $I_L$  e  $I_R$ ) deve ser considerado. Esta relação é verdadeira, mas, considerando a forma de onda da corrente de uma FAI, mostrada na Figura 2.8(a), quais os fasores que devem ser escolhidos e aplicados na expressão (4.3) para a melhor estimativa da distância da falta? Esta pergunta pode ser respondida com a abordagem apresentada nos subtítulos seguintes.

#### 4.1.2 Estimativa de Fasores Consecutivos

A partir das medidas em ambos os terminais da linha de transmissão mostrada na Figura 4.1, os sinais de tensões e correntes são amostrados pelo registrador de faltas com uma frequência de amostragem pré-selecionada  $f_s = 1/T_s$ , em que  $T_s$  é o período de amostragem. Assim,  $N$  amostras podem ser obtidas em uma janela com período  $T_0 = 1/f_0$ , onde  $f_0$  é a frequência fundamental do SEP analisado, com  $N = f_s/f_0$ . Finalmente, um conjunto de  $N$  fasores pode ser determinado conforme a expressão (4.4) (PHADKE; THORP, 2008):

$$\left. \begin{aligned} X_{n_0} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=n_0}^{n_0+(N-1)} x_k e^{-j \frac{2\pi n_0}{N}} \\ X_{n_0+1} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=n_0+1}^{n_0+N} x_k e^{-j \frac{2\pi(n_0+1)}{N}} \\ X_{n_0+2} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=n_0+1}^{n_0+(N+1)} x_k e^{-j \frac{2\pi(n_0+2)}{N}} \\ &\dots \\ X_{n_0+(N-1)} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=n_0+(N-1)}^{n_0+2(N-1)} x_k e^{-j \frac{2\pi(n_0+(N-1))}{N}} \end{aligned} \right\}, \quad (4.4)$$

onde  $n_0$  é uma amostra de referência arbitrária.

A partir do exposto na expressão (4.4), é possível estimar consecutivos fasores de tensões e correntes, a partir de uma amostra de referência arbitrária  $n_0$ , usando uma janela móvel de período  $T_0$  deslocada de uma amostra a cada passo. Assim, este processo resultará em conjuntos de  $N$  fasores de tensão e  $N$  fasores de corrente para cada barra do sistema apresen-

tado na Figura 4.1. A equação (4.4) mostra a forma de calcular os fasores pela definição da série discreta de Fourier (do inglês *Discrete Fourier Series* - DFS). Entretanto, estes fasores podem ser estimados utilizando-se a DFT, conforme proposto em (PHADKE; THORP, 2008; SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

Para ilustrar o que fora descrito na expressão (4.4), considere a Figura 4.2. Na Figura 4.2(a) é retratado o sinal de corrente considerando-se uma FAI-FT em uma linha de transmissão, registrado na barra local. A Figura 4.2(b) mostra o exemplo de uma janela móvel aplicada no sinal de corrente da Figura 4.2(a). Para este caso, a taxa de amostragem é de 20 amostras por ciclo ( $N = 20$  amostras/ciclo), em que,  $J_1, J_2, J_3, \dots, J_N$  são as janelas móveis e  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_N$  são os consecutivos fasores estimados.

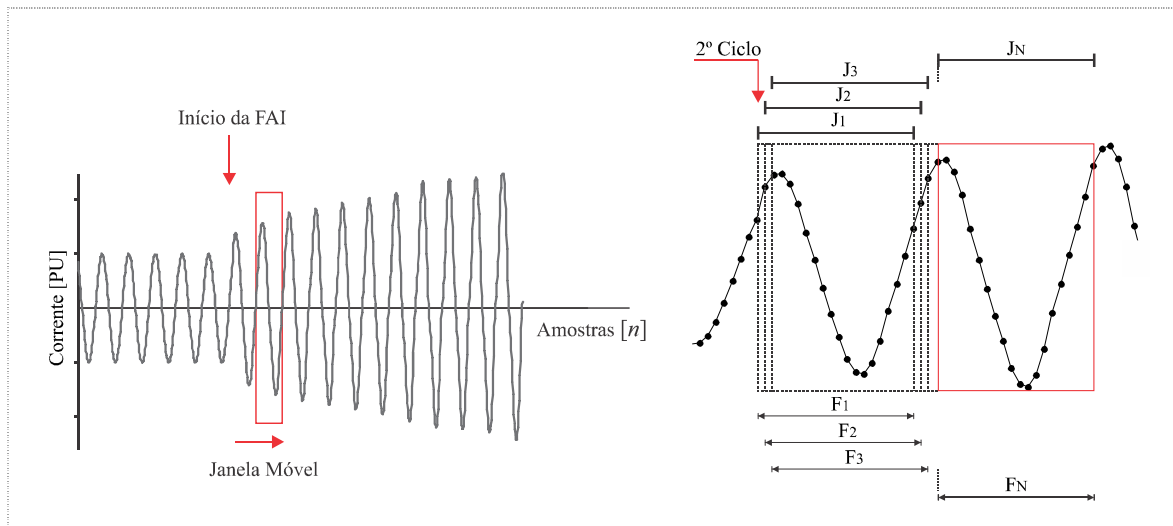


Figura 4.2 - Representação gráfica dos consecutivos fasores estimados.  
Fonte: O autor (2014).

### 4.1.3 Abordagem Baseada no Estimador de Mínimos Quadrados

Após a detecção de uma FAI na linha de transmissão mostrada na Figura 4.1, considere que  $N$  fasores de  $V_L, V_R, I_L$  e  $I_R$  foram estimados dentro de uma janela de período  $T_0$  dos sinais de tensões e correntes segundo o processo descrito anteriormente. Cada conjunto de fasores de  $V_L, V_R, I_L$  e  $I_R$  deve satisfazer a expressão (4.3). Entretanto, devido às características das FAI, descritas no Capítulo 2, a utilização de  $N$  conjuntos de fasores de  $V_L, V_R, I_L$  e  $I_R$  na expressão (4.3) resultaria em  $N$  equações com possíveis distintos  $N$  valores de  $x$ .

Para a técnica de LDFAI proposta, considere a aplicação da expressão (4.3) sobre os  $N$  conjuntos de fasores de  $V_L, V_R, I_L$  e  $I_R$ , que resulta em:

$$Z_l \left\{ \begin{bmatrix} I_{L-1} \\ I_{L-2} \\ \vdots \\ I_{L-N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{R-1} \\ I_{R-2} \\ \vdots \\ I_{R-N} \end{bmatrix} \right\} x = \begin{bmatrix} V_{L-1} \\ V_{L-2} \\ \vdots \\ V_{L-N} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{R-1} \\ V_{R-2} \\ \vdots \\ V_{R-N} \end{bmatrix} + l Z_l \begin{bmatrix} I_{R-1} \\ I_{R-2} \\ \vdots \\ I_{R-N} \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

A expressão (4.5), reescrita de forma compacta, é dada por:

$$\mathbf{A}_{1N} x = \mathbf{b}_{1N}. \quad (4.6)$$

Onde o subscrito 1 denota a abordagem para uma linha de transmissão monofásica e:

$$\mathbf{A}_{1N} = Z_l \left\{ \begin{bmatrix} I_{L-1} \\ I_{L-2} \\ \vdots \\ I_{L-N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{R-1} \\ I_{R-2} \\ \vdots \\ I_{R-N} \end{bmatrix} \right\}, \quad (4.7)$$

$$\mathbf{b}_{1N} = \begin{bmatrix} V_{L-1} \\ V_{L-2} \\ \vdots \\ V_{L-N} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{R-1} \\ V_{R-2} \\ \vdots \\ V_{R-N} \end{bmatrix} + l Z_l \begin{bmatrix} I_{R-1} \\ I_{R-2} \\ \vdots \\ I_{R-N} \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Verifica-se que a expressão (4.5) é dada por um conjunto de  $N$  equações lineares, sendo a distância da falta  $x$  a única variável a ser estimada. Segundo a expressão (4.6), a determinação da distância da falta requer a inversão da matriz  $\mathbf{A}_{1N}$ , entretanto  $\mathbf{A}_{1N}$  não é uma matriz quadrada. A partir dessas observações conclui-se que a expressão (4.6) descreve um sistema sobredeterminado de equações lineares, ou seja, o número de equações é maior do que o número de variáveis a serem determinadas.

Uma consideração razoável para a estimativa de  $x$  na expressão (4.6) é reconhecer que existe um erro associado (AGUIRRE, 2007), de tal forma que pode ser reescrita segundo:

$$\mathbf{b}_{1N} = \mathbf{A}_{1N} x + \mathbf{e}, \quad (4.9)$$

onde  $\mathbf{e}$  é o vetor dos erros e é escrito de acordo com:

$$\mathbf{e} = \mathbf{b}_{1N} - \mathbf{A}_{1N} x. \quad (4.10)$$

Pré-multiplicando ambos os lados da expressão (4.10) pelo vetor transposto dos erros ( $\mathbf{e}^T$ ) resulta que:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{b}_{1N} - \mathbf{A}_{1N} x)^T (\mathbf{b}_{1N} - \mathbf{A}_{1N} x). \quad (4.11)$$

A expressão (4.11) pode ser expandida conforme:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{e} = x^T \mathbf{A}_{1N}^T \mathbf{A}_{1N} x - x^T \mathbf{A}_{1N}^T \mathbf{b}_{1N} - \mathbf{b}_{1N}^T \mathbf{A}_{1N} x + \mathbf{b}_{1N}^T \mathbf{b}_{1N}. \quad (4.12)$$

O valor de  $x$  que minimiza  $\mathbf{e}^T \mathbf{e}$  pode ser obtido a partir da derivada parcial da expressão (4.12) em relação a  $x$  igualada a zero, o que resulta em:

$$\hat{x} = \left( |\mathbf{A}_{1N}|^T |\mathbf{A}_{1N}| \right)^{-1} |\mathbf{A}_{1N}|^T |\mathbf{b}_{1N}|. \quad (4.13)$$

Na expressão (4.1) utiliza-se o módulo das matrizes coluna  $\mathbf{A}_{1N}$  e  $\mathbf{b}_{1N}$  porque a distância da falta é um número real positivo, logo  $\hat{x}$  também deve ser um número real positivo, em que  $\hat{x} \in \mathfrak{R}_+$ .

Destá forma, a técnica de LDFAI proposta baseia-se na solução de um sistema sobre-determinado de equações lineares aplicando-se o MMQ<sup>13</sup>, cujo objetivo é determinar a melhor estimativa da variável  $x$ , de modo tal que o erro cometido ao se tentar descrever  $\mathbf{b}_{1N}$  como  $\mathbf{A}_{1N} x$  seja mínimo.

#### 4.1.4 Critérios para a Escolha da Amostra de Referência e da Taxa de Amostragem

Um dos objetivos deste trabalho consiste na aplicação da técnica proposta na localização de faltas momentâneas ou permanentes, conceituadas no Capítulo 2.

Nas ocorrências de faltas momentâneas, a corrente de falta aumenta em poucos ciclos e pode não atingir um comportamento estável devido à atuação de um equipamento religador automático ou porque o contato entre o condutor energizado e a superfície envolvida é de curta duração. Já na ocorrência de faltas permanentes, a corrente de falta também aumenta em poucos ciclos, podem atingir um comportamento estável ou de regime permanente antes da atuação de um dispositivo de proteção.

Neste sentido, na técnica de LDFAI proposta nesta tese, a amostra de referência  $n_0$  é a primeira amostra do segundo ciclo após a detecção da FAI para faltas momentâneas e a primeira amostra do terceiro ciclo antes da abertura da linha pela atuação dos dispositivos de proteção para faltas permanentes.

A Figura 4.3 mostra um sinal de corrente com incidência de uma FAI momentânea detectada em 0,098 s, sendo a duração desta FAI de aproximadamente 4 ciclos de 60 Hz. Identifica-se também na Figura 4.3 a posição da amostra de referência  $n_0$  para este tipo de falta.

<sup>13</sup> Uma revisão do método de mínimos quadrados é apresentada no Anexo A.



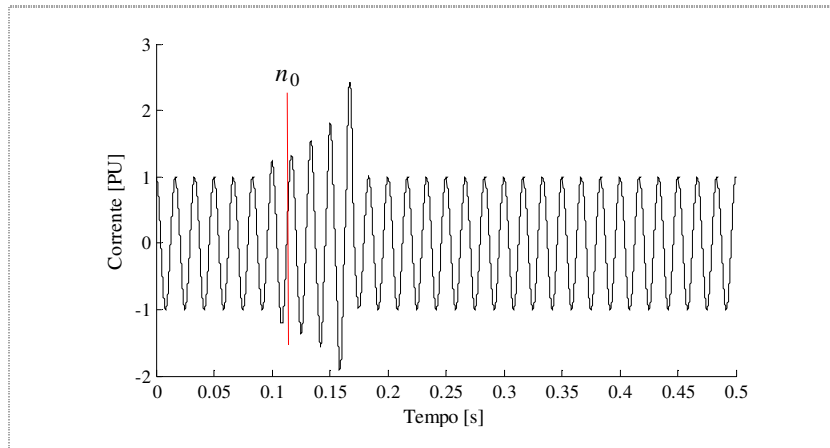


Figura 4.3 - Forma de onda de corrente de uma FAI momentânea.  
Fonte: O autor (2014).

A Figura 4.4 mostra um sinal de corrente com incidência de uma FAI permanente detectada em 0,098 s, em que para esta condição a duração da FAI é de aproximadamente 20 ciclos de 60 Hz. A Figura 4.4 apresenta também a posição da amostra de referência  $n_0$  para este tipo de falta.

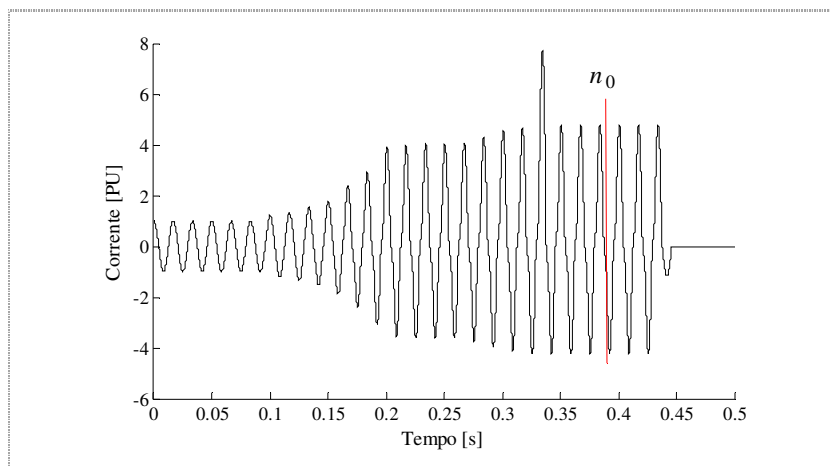


Figura 4.4 - Forma de onda de corrente de uma FAI permanente.  
Fonte: O autor (2014).

Outro objetivo do trabalho apresentado nesta tese é a aplicabilidade da técnica de LDFAI proposta a casos reais. Desta forma, observa-se que os valores das taxas de amostragem  $N$ , adotados nas simulações para análise de sensibilidade da técnica proposta, foram definidos a partir das características de equipamentos comerciais. O Quadro 4.1 apresenta os valores típicos das taxas de amostragem para RDP (PEREZ, 2010) e para Relés de Proteção (RP) (PHADKE; THORP, 2008).

Quadro 4.1 - Características gerais das técnicas de LDFAI.

Taxa de Amostragem [amostras / ciclo]	Frequência de Amostragem [Hz] - 60 Hz
RDP	
32	1.920
64	3.840
96	5.760
128	7.680
256	15.360
384	23.040
RP	
16	960
20	1.200
32	1.920
40	2.400
50	3.000
64	3.840
80	4.800
100	6.000
128	7.680

Fonte: (PEREZ, 2010; PHADKE; THORP, 2008).

#### 4.2 PROPOSIÇÃO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: EXTENSÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS SIMPLES

Para a extensão da técnica de LDFAI para sistemas trifásicos, considere a linha de transmissão trifásica simples mostrada na Figura 4.5 com ocorrência de uma FAI no ponto F, em que, novamente, as Barras L e R denominam-se barras local e remoto, respectivamente.

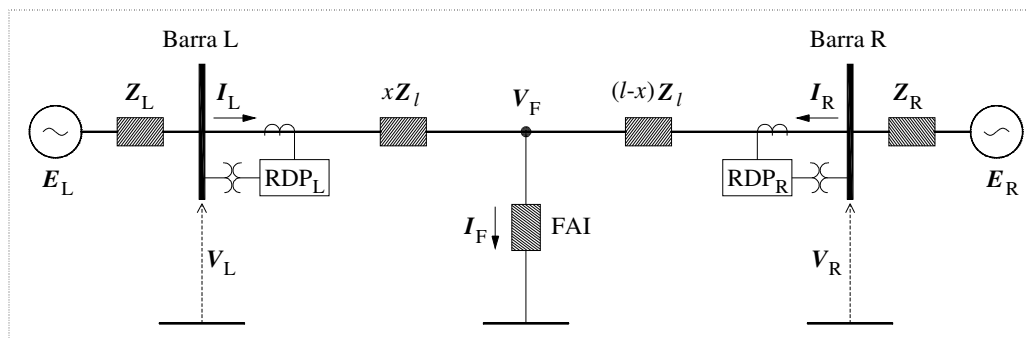


Figura 4.5 - Linha de transmissão trifásica simples sob falha.

Fonte: O autor (2014).

Sendo utilizadas as seguintes notações:

$E_L$  é o vetor de tensões da fonte equivalente da barra local [V];

$E_R$  é o vetor de tensões da fonte equivalente da barra remota [V];

$V_L$  é o vetor das tensões de fase da barra local [V];

$V_R$  é o vetor das tensões de fase da barra remota [V];

- $V_F$  é o vetor das tensões em cada fase no ponto da falta [V];  
 $I_L$  é o vetor das correntes de linha da barra local [A];  
 $I_R$  é o vetor das correntes de linha da barra remota [A];  
 $I_F$  é o vetor das correntes de falta [A];  
 $Z_l$  é a matriz de impedâncias da linha de transmissão [ $\Omega/\text{km}$ ];  
 $Z_L$  é a matriz de impedâncias equivalentes da barra local [ $\Omega$ ];  
 $Z_R$  é a matriz de impedâncias equivalentes da barra remota [ $\Omega$ ];  
 $x$  distância da falta em relação à barra local [km];  
 $l$  comprimento total da linha de transmissão [km];  
RDP registrador digital de perturbação.

Para uma linha de transmissão trifásica simples, a partir do diagrama mostrado na Figura 4.5 e da expressão (4.2), escreve-se, em notação fasorial, que:

$$\mathbf{[Z_l(I_L + I_R)]} \cdot x = V_L - V_R + l Z_l I_R, \quad (4.14)$$

onde:

$$V_L = [V_{La} \quad V_{Lb} \quad V_{Lc}]^T, \quad (4.15)$$

$$V_R = [V_{Ra} \quad V_{Rb} \quad V_{Rc}]^T, \quad (4.16)$$

$$I_L = [I_{La} \quad I_{Lb} \quad I_{Lc}]^T, \quad (4.17)$$

$$I_R = [I_{Ra} \quad I_{Rb} \quad I_{Rc}]^T, \quad (4.18)$$

$$Z_l = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

em que:

- $V_{La}, V_{Lb},$  e  $V_{Lc}$  são as tensões nas fases  $a, b$  e  $c$ , respectivamente, obtidas na barra L;  
 $V_{Ra}, V_{Rb},$  e  $V_{Rc}$  são as tensões nas fases  $a, b$  e  $c$ , respectivamente, obtidas na barra R;  
 $I_{La}, I_{Lb},$  e  $I_{Lc}$  são as correntes nas fases  $a, b$  e  $c$ , respectivamente, obtidas na barra L;  
 $I_{Ra}, I_{Rb},$  e  $I_{Rc}$  são as correntes nas fases  $a, b$  e  $c$ , respectivamente, obtidas na barra R;  
 $z_{aa}, z_{bb}$  e  $z_{cc}$  são as impedâncias próprias das fases  $a, b$  e  $c$ , respectivamente, da linha de transmissão;  
 $z_{ab}, z_{ac}$  e  $z_{bc}$  são as impedâncias mútuas entre as fases  $a, b$  e  $c$  da linha de transmissão.

Observa-se que a notação em negrito na equação (4.14) denota, em relação à expressão (4.2), a representação de vetores e matrizes.

A expressão (4.14), reescrita de forma compacta, resulta em:

$$\mathbf{A}_{3S} x = \mathbf{b}_{3S}, \quad (4.20)$$

onde o subscrito 3S denota a abordagem para uma linha de transmissão trifásica simples e:

$$\mathbf{b}_{3S} = \mathbf{V}_L - \mathbf{V}_R + l \mathbf{Z}_l \mathbf{I}_R, \quad (4.21)$$

$$\mathbf{A}_{3S} = \mathbf{Z}_l (\mathbf{I}_L + \mathbf{I}_R), \quad (4.22)$$

ou ainda,

$$\mathbf{b}_{3S} = \begin{bmatrix} V_{La} - V_{Ra} + l(z_{aa} I_{Ra} + z_{ab} I_{Rb} + z_{ac} I_{Rc}) \\ V_{Lb} - V_{Rb} + l(z_{ba} I_{Ra} + z_{bb} I_{Rb} + z_{bc} I_{Rc}) \\ V_{Lc} - V_{Rc} + l(z_{ca} I_{Ra} + z_{cb} I_{Rb} + z_{cc} I_{Rc}) \end{bmatrix}, \quad (4.23)$$

$$\mathbf{A}_{3S} = \begin{bmatrix} z_{aa} (I_{La} + I_{Ra}) + z_{ab} (I_{Lb} + I_{Rb}) + z_{ac} (I_{Lc} + I_{Rc}) \\ z_{ba} (I_{La} + I_{Ra}) + z_{bb} (I_{Lb} + I_{Rb}) + z_{bc} (I_{Lc} + I_{Rc}) \\ z_{ca} (I_{La} + I_{Ra}) + z_{cb} (I_{Lb} + I_{Rb}) + z_{cc} (I_{Lc} + I_{Rc}) \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Por exemplo, a estimativa de  $x$ , para uma FAI Fase-Terra na fase  $a$ , pode ser obtida a partir da expressão (4.20), reescrita segundo:

$$x = \frac{|V_{La} - V_{Ra} + l(z_{aa} I_{Ra} + z_{ab} I_{Rb} + z_{ac} I_{Rc})|}{|z_{aa} (I_{La} + I_{Ra}) + z_{ab} (I_{Lb} + I_{Rb}) + z_{ac} (I_{Lc} + I_{Rc})|}. \quad (4.25)$$

Já para faltas bifásicas e trifásicas à terra, a solução para a estimativa de  $x$ , a partir da expressão (4.20), pode ser obtida aplicando-se o MMQ. Contudo, novamente, a pergunta a ser respondida, hajam vista as características das FAI, é: quais os fasores que devem ser escolhidos e aplicados nas respectivas expressões para a estimativa da distância da falta? Mais uma vez, a resposta a esta pergunta pode ser obtida segundo a técnica de LDFAI proposta.

Na subseção subsequente são apresentadas explicitamente as expressões para localização de faltas em linhas de transmissão simples, considerando a técnica proposta, para faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas à terra.

#### 4.2.1 Faltas Fase-Terra

A expressão (4.20), reescrita para FAI Fase-Terra (FAI-FT) em linhas de transmissão trifásicas simples é dada por:

$$\mathbf{A}_{3SN-FT\Omega} x = \mathbf{b}_{3SN-FT\Omega}, \quad (4.26)$$

onde  $\Omega = \{a, b, c\}$  representa a fase envolvida na falta.

Substituindo cada conjunto de  $N$  fasores de  $V_{L\Omega}$ ,  $V_{R\Omega}$ ,  $I_{L\Omega}$  e  $I_{R\Omega}$ , determinados e aplicados segundo o desenvolvimento apresentado nas seções 5.3.2 e 5.3.3, respectivamente, na

expressão (4.26) obtém-se as subseqüentes matrizes  $\mathbf{b}_{3SN-FT\Omega}$  e  $\mathbf{A}_{3SN-FT\Omega}$  para FAI-FTa, FAI-FTb e FAI-FTc.

#### A. FAI-FTa

$$\mathbf{b}_{3SN-FTa} = [\mathbf{V}_{La-k} - \mathbf{V}_{Ra-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k})], \quad (4.27)$$

$$\mathbf{A}_{3SN-FTa} = [z_{aa} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{ab} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{ac} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k})]. \quad (4.28)$$

Onde  $k = 1, 2, 3, \dots, N$  e:

$$\mathbf{V}_{L\Omega-k} = \begin{bmatrix} V_{L\Omega-1} \\ V_{L\Omega-2} \\ \vdots \\ V_{L\Omega-N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_{R\Omega-k} = \begin{bmatrix} V_{R\Omega-1} \\ V_{R\Omega-2} \\ \vdots \\ V_{R\Omega-N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{L\Omega-k} = \begin{bmatrix} I_{L\Omega-1} \\ I_{L\Omega-2} \\ \vdots \\ I_{L\Omega-N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{R\Omega-k} = \begin{bmatrix} I_{R\Omega-1} \\ I_{R\Omega-2} \\ \vdots \\ I_{R\Omega-N} \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Considere para as FAI-FTb e FAI-FTc as mesmas notações acima descritas para a FAI-FTa.

#### B. FAI-FT-b

$$\mathbf{b}_{3SN-FTb} = [\mathbf{V}_{Lb-k} - \mathbf{V}_{Rb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k})], \quad (4.30)$$

$$\mathbf{A}_{3SN-FTb} = [z_{ba} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{bb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{bc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k})]. \quad (4.31)$$

#### C. FAI-FT-c

$$\mathbf{b}_{3SN-FTc} = [\mathbf{V}_{Lc-k} - \mathbf{V}_{Rc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k})], \quad (4.32)$$

$$\mathbf{A}_{3SN-FTc} = [z_{ca} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{cb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{cc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k})]. \quad (4.33)$$

Desta forma, são determinadas as três expressões para localização de FAI-FT utilizadas para estimar a distância da falta mediante o MMQ.

### 4.2.2 Faltas Fase-Fase-Terra

Novamente, a expressão (4.20), reescrita para FAI Fase-Fase-Terra (FAI-FFT) em linhas de transmissão trifásicas simples é dada por:

$$\mathbf{A}_{3SN-FFT\Omega} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{3SN-FFT\Omega}, \quad (4.34)$$

onde  $\Omega = \{a, b, c\}$  representa as fases envolvidas na falta.

De forma similar, substituindo cada conjunto de  $N$  fasores de  $V_{L\Omega}$ ,  $V_{R\Omega}$ ,  $I_{L\Omega}$  e  $I_{R\Omega}$  na expressão (4.34) obtém-se, para FAI-FFTab, FAI-FFTac e FAI-FFTbc, as subseqüentes matrizes  $\mathbf{b}_{3SN\text{-FF}\Omega}$  e  $\mathbf{A}_{3SN\text{-FF}\Omega}$ .

#### A. FAI-FFTab

$$\mathbf{b}_{3SN\text{-FFTab}} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{La-k} - \mathbf{V}_{Ra-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ \mathbf{V}_{Lb-k} - \mathbf{V}_{Rb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.35)$$

$$\mathbf{A}_{3SN\text{-FFTab}} = \begin{bmatrix} z_{aa} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{ab} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{ac} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ z_{ba} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{bb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{bc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

#### B. FAI-FFTac

$$\mathbf{b}_{3SN\text{-FFTac}} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{La-k} - \mathbf{V}_{Ra-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ \mathbf{V}_{Lc-k} - \mathbf{V}_{Rc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.37)$$

$$\mathbf{A}_{3SN\text{-FFTac}} = \begin{bmatrix} z_{aa} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{ab} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{ac} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ z_{ca} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{cb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{cc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}. \quad (4.38)$$

#### C. FAI-FFTbc

$$\mathbf{b}_{3SN\text{-FFTbc}} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{Lb-k} - \mathbf{V}_{Rb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ \mathbf{V}_{Lc-k} - \mathbf{V}_{Rc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.39)$$

$$\mathbf{A}_{3SN\text{-FFTbc}} = \begin{bmatrix} z_{ba} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{bb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{bc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ z_{ca} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{cb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{cc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}. \quad (4.40)$$

Assim, são descritas as três expressões para localização de FAI-FFT empregadas para estimar a distância da falta considerando o MMQ.

### 4.2.3 Faltas Fase-Fase-Fase-Terra

Finalmente, a expressão (4.20), reescrita para FAI Fase-Fase-Fase-Terra (FAI-FFFT) em linhas de transmissão trifásicas simples é dada conforme:

$$\mathbf{A}_{3SN\text{-FFFT}\Omega} x = \mathbf{b}_{3SN\text{-FFFT}\Omega}, \quad (4.41)$$

onde  $\Omega = \{a, b, c\}$  representa as fases envolvidas na falta.

Analogamente, substituindo cada conjunto de  $N$  fasores de  $V_{L\Omega}$ ,  $V_{R\Omega}$ ,  $I_{L\Omega}$  e  $I_{R\Omega}$  na expressão (4.41) escreve-se, para FAI-FFFT, as seguintes matrizes  $\mathbf{b}_{3SN\text{-FFFT}\Omega}$  e  $\mathbf{A}_{3SN\text{-FFFT}\Omega}$ :

$$\mathbf{b}_{3SN\text{-FFFT}} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{La-k} - \mathbf{V}_{Ra-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ \mathbf{V}_{Lb-k} - \mathbf{V}_{Rb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ \mathbf{V}_{Lc-k} - \mathbf{V}_{Rc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.42)$$

$$\mathbf{A}_{3SN-FFFT} = \begin{bmatrix} z_{aa} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{ab} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{ac} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ z_{ba} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{bb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{bc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ z_{ca} (\mathbf{I}_{La-k} + \mathbf{I}_{Ra-k}) + z_{cb} (\mathbf{I}_{Lb-k} + \mathbf{I}_{Rb-k}) + z_{cc} (\mathbf{I}_{Lc-k} + \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}. \quad (4.43)$$

Desta maneira, define-se a expressão para localização de FAI-FFFT utilizada para estimar a distância da falta a partir do MMQ.

Observa-se que as expressões acima descritas para FAI-FT e FAI-FFFT são casos particulares das equações (4.41), (4.42) e (4.43), haja vista que o estudo contempla as faltas à terra.

A solução para a estimativa da distância da falta, considerando-se as expressões (4.26), (4.34) e (4.41), é obtida segundo a abordagem proposta e aplicando-se o MMQ conforme:

$$\hat{x}_K = \left( \left| \mathbf{A}_{3SN-K} \right|^T \left| \mathbf{A}_{3SN-K} \right| \right)^{-1} \left| \mathbf{A}_{3SN-K} \right|^T \mathbf{b}_{3SN-K}, \quad (4.44)$$

onde  $K = \{FT\Omega, FFT\Omega, FFFT\Omega\}$  representa os tipos de faltas.

### 4.3 PROPOSIÇÃO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: EXTENSÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS PARALELAS

Esta tese contempla, ainda, a aplicação da técnica proposta na LFAI em linhas de transmissão trifásicas paralelas. Para isso, considere o diagrama mostrado na Figura 4.6, com ocorrência de uma FAI no ponto F da linha 1. As notações utilizadas na Figura 4.6 são as mesmas que foram descritas na seção 4.4 e na Figura 4.5.

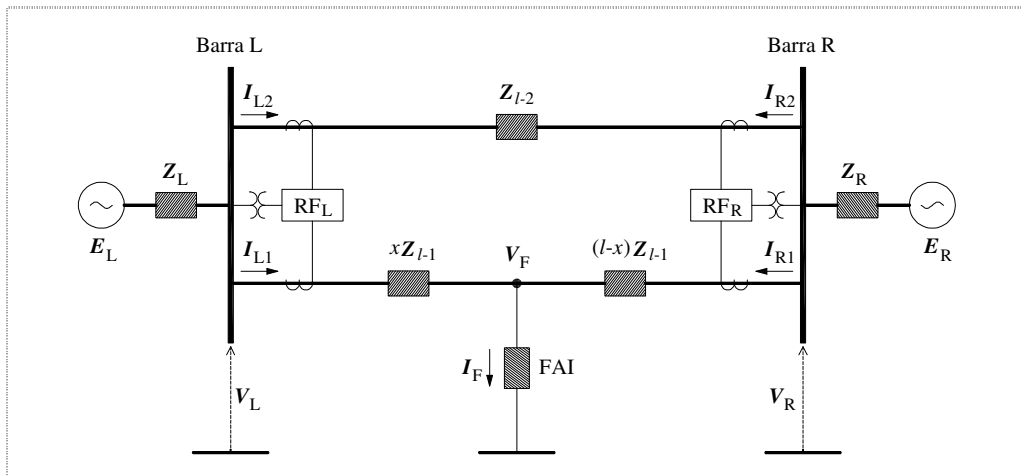


Figura 4.6 - Linha de transmissão trifásica dupla sob falta na linha 1.  
Fonte: O autor (2014).

Para facilitar a compreensão das notações utilizadas nas expressões que se seguem, considere o segmento de uma linha de transmissão trifásica paralela mostrada na Figura 4.7.

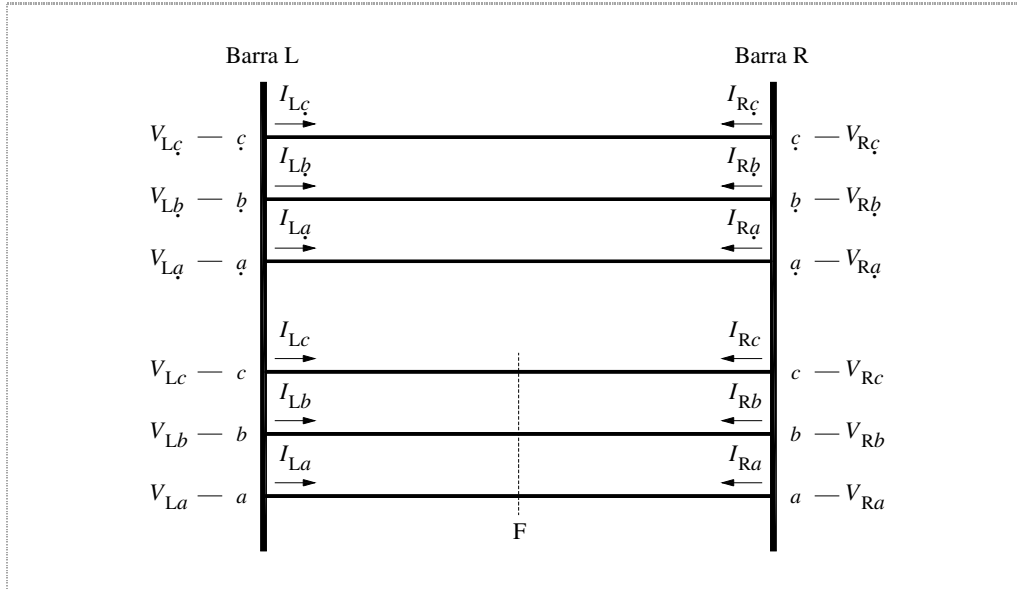


Figura 4.7 - Segmento de uma linha de transmissão trifásica paralela.

Fonte: O autor (2014).

A partir do diagrama mostrado na Figura 4.6 e de forma semelhante ao procedimento adotado para obtenção da expressão (4.20) escreve-se a seguinte relação;

$$\mathbf{A}_{3P} x = \mathbf{b}_{3P}, \quad (4.45)$$

onde o subscrito 3P denota a abordagem para uma linha de transmissão trifásica paralela e:

$$\mathbf{b}_{3P} = \mathbf{V}_L - \mathbf{V}_R + l \mathbf{Z}_l \mathbf{I}_R, \quad (4.46)$$

$$\mathbf{A}_{3P} = \mathbf{Z}_l (\mathbf{I}_L + \mathbf{I}_R), \quad (4.47)$$

ou ainda,

$$\mathbf{b}_{3P} = \begin{bmatrix} V_{LRaa} + l(z_{aa} I_{Ra} + z_{ab} I_{Rb} + z_{ac} I_{Rc} + z_{aa} I_{Ra} + z_{ab} I_{Rb} + z_{ac} I_{Rc}) \\ V_{LRbb} + l(z_{ba} I_{Ra} + z_{bb} I_{Rb} + z_{bc} I_{Rc} + z_{ba} I_{Ra} + z_{bb} I_{Rb} + z_{bc} I_{Rc}) \\ V_{LRcc} + l(z_{ca} I_{Ra} + z_{cb} I_{Rb} + z_{cc} I_{Rc} + z_{ca} I_{Ra} + z_{cb} I_{Rb} + z_{cc} I_{Rc}) \\ V_{LRaa} + l(z_{aa} I_{Ra} + z_{ab} I_{Rb} + z_{ac} I_{Rc} + z_{aa} I_{Ra} + z_{ab} I_{Rb} + z_{ac} I_{Rc}) \\ V_{LRbb} + l(z_{ba} I_{Ra} + z_{bb} I_{Rb} + z_{bc} I_{Rc} + z_{ba} I_{Ra} + z_{bb} I_{Rb} + z_{bc} I_{Rc}) \\ V_{LRcc} + l(z_{ca} I_{Ra} + z_{cb} I_{Rb} + z_{cc} I_{Rc} + z_{ca} I_{Ra} + z_{cb} I_{Rb} + z_{cc} I_{Rc}) \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

e



$$\mathbf{A}_{3P} = \begin{bmatrix} z_{aa} I_{LRaa} + z_{ab} I_{LRbb} + z_{ac} I_{LRcc} + z_{aa} I_{LRaa} + z_{ab} I_{LRbb} + z_{ac} I_{LRcc} \\ z_{ba} I_{LRaa} + z_{bb} I_{LRbb} + z_{bc} I_{LRcc} + z_{ba} I_{LRaa} + z_{bb} I_{LRbb} + z_{bc} I_{LRcc} \\ z_{ca} I_{LRaa} + z_{cb} I_{LRbb} + z_{cc} I_{LRcc} + z_{ca} I_{LRaa} + z_{cb} I_{LRbb} + z_{cc} I_{LRcc} \\ z_{aa} I_{LRaa} + z_{ab} I_{LRbb} + z_{ac} I_{LRcc} + z_{aa} I_{LRaa} + z_{ab} I_{LRbb} + z_{ac} I_{LRcc} \\ z_{ba} I_{LRaa} + z_{bb} I_{LRbb} + z_{bc} I_{LRcc} + z_{ba} I_{LRaa} + z_{bb} I_{LRbb} + z_{bc} I_{LRcc} \\ z_{ca} I_{LRaa} + z_{cb} I_{LRbb} + z_{cc} I_{LRcc} + z_{ca} I_{LRaa} + z_{cb} I_{LRbb} + z_{cc} I_{LRcc} \end{bmatrix}. \quad (4.49)$$

Onde:

$$\begin{aligned} V_{LRaa} &= V_{La} - V_{Ra} & V_{LRaa} &= V_{La} - V_{Ra} \\ V_{LRbb} &= V_{Lb} - V_{Rb} & V_{LRbb} &= V_{Lb} - V_{Rb} \\ V_{LRcc} &= V_{Lc} - V_{Rc} & V_{LRcc} &= V_{Lc} - V_{Rc} \end{aligned} \quad (4.50)$$

e

$$\begin{aligned} I_{LRaa} &= I_{La} + I_{Ra} & I_{LRaa} &= I_{La} + I_{Ra} \\ I_{LRbb} &= I_{Lb} + I_{Rb} & I_{LRbb} &= I_{Lb} + I_{Rb} \\ I_{LRcc} &= I_{Lc} + I_{Rc} & I_{LRcc} &= I_{Lc} + I_{Rc} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Nas expressões (4.48) e (4.49), complementado a Figura 4.7, as seguintes notações são usadas;

$z_{aa}$ ,  $z_{bb}$  e  $z_{cc}$  são as impedâncias próprias das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ , respectivamente, da linha de transmissão 1;

$z_{ab}$ ,  $z_{ac}$  e  $z_{bc}$  são as impedâncias mútuas entre as fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  da linha de transmissão 1;

$z_{aa}$ ,  $z_{bb}$  e  $z_{cc}$  são as impedâncias próprias das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ , respectivamente, da linha de transmissão 2;

$z_{ab}$ ,  $z_{ac}$  e  $z_{bc}$  são as impedâncias mútuas entre as fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  da linha de transmissão 2.

Na subseção subsequente são apresentadas as expressões para localização de faltas em linhas de transmissão paralelas para faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas à terra.

### 4.3.1 Faltas Fase-Terra

Reescrevendo a expressão (4.45) para FAI-FT em linhas de transmissão trifásicas paralelas resulta que:

$$\mathbf{A}_{3PN-FT\Omega} x = \mathbf{b}_{3PN-FT\Omega}, \quad (4.52)$$

onde  $\Omega = \{a, b, c\}$  representa a fase envolvida na falta.

Considerando o mesmo raciocínio usado anteriormente para linhas de transmissão simples, ou seja, substituindo cada conjunto de  $N$  fasores de tensões e correntes, obtidos nas barras local e remota do segmento de linha mostrado na Figura 4.7, na expressão (4.52), obtém-se as subseqüentes matrizes  $\mathbf{b}_{3PN-FT\Omega}$  e  $\mathbf{A}_{3PN-FT\Omega}$ .

#### A. FAI-FTa

$$\mathbf{b}_{3PN-FTa} = \left[ \mathbf{V}_{LRaa-k} + l \left( z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k} \right) \right], \quad (4.53)$$

$$\mathbf{A}_{3PN-FTa} = \left[ z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} \right]. \quad (4.54)$$

Onde  $k = 1, 2, 3, \dots, N$  e:

$$\mathbf{V}_{LR\Omega-k} = \begin{bmatrix} V_{LR\Omega-1} \\ V_{LR\Omega-2} \\ \vdots \\ V_{LR\Omega-N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{R\Omega-k} = \begin{bmatrix} I_{R\Omega-1} \\ I_{R\Omega-2} \\ \vdots \\ I_{R\Omega-N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{LR\Omega-k} = \begin{bmatrix} I_{LR\Omega-1} \\ I_{LR\Omega-2} \\ \vdots \\ I_{LR\Omega-N} \end{bmatrix}, \quad (4.55)$$

em que  $\Omega = \{a, b, c, a, b, c\}$  representa as fases envolvidas no equacionamento.

Considere para as FAI-FTb e FAI-FTc as mesmas notações acima descritas para a FAI-FTa.

#### B. FAI-FT-b

$$\mathbf{b}_{3PN-FTb} = \left[ \mathbf{V}_{LRbb-k} + l \left( z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k} \right) \right], \quad (4.56)$$

$$\mathbf{A}_{3PN-FTb} = \left[ z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \right]. \quad (4.57)$$

#### C. FAI-FT-c

$$\mathbf{b}_{3PN-FTc} = \left[ \mathbf{V}_{LRcc-k} + l \left( z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k} \right) \right], \quad (4.58)$$

$$\mathbf{A}_{3PN-FTc} = \left[ z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \right]. \quad (4.59)$$

Assim, determinam-se as três expressões para localização de FAI-FT utilizadas para estimar a distância da falta mediante o MMQ.

### 4.3.2 Faltas Fase-Fase-Terra

Novamente, a expressão (4.45), reescrita para FAI-FFT em linhas de transmissão trifásicas paralelas é dada por:

$$\mathbf{A}_{3PN-FFT\Omega} x = \mathbf{b}_{3PN-FFT\Omega}, \quad (4.60)$$

onde  $\Omega = \{a, b, c\}$  representa as fases envolvidas na falta.

De forma similar, a substituição de cada conjunto de  $N$  fasores de tensões e correntes, obtidos nas barras local e remota do segmento de linha mostrado na Figura 4.7, na expressão (4.60) resulta, para FAI-FFT $ab$ , FAI-FFT $ac$  e FAI-FFT $bc$ , nas matrizes  $\mathbf{b}_{3PN-FFT\Omega}$  e  $\mathbf{A}_{3PN-FFT\Omega}$  a seguir.

#### A. FAI-FFT $ab$

$$\mathbf{b}_{3PN-FFTab} = \begin{bmatrix} V_{LRaa-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRbb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.61)$$

$$\mathbf{A}_{3PN-FFTab} = \begin{bmatrix} z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \end{bmatrix}. \quad (4.62)$$

#### B. FAI-FFT $ac$

$$\mathbf{b}_{3PN-FFTac} = \begin{bmatrix} V_{LRaa-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRcc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.63)$$

$$\mathbf{A}_{3PN-FFTac} = \begin{bmatrix} z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \end{bmatrix}. \quad (4.64)$$

#### C. FAI-FFT $bc$

$$\mathbf{b}_{3PN-FFTbc} = \begin{bmatrix} V_{LRbb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRcc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.65)$$

$$\mathbf{A}_{3PN-FFTbc} = \begin{bmatrix} z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \end{bmatrix}. \quad (4.66)$$

Assim, são descritas as três expressões para localização de FAI-FFT empregadas para estimar a distância da falta considerando o MMQ.

### 4.3.3 Faltas Fase-Fase-Fase-Terra

Finalmente, reescrevendo a expressão (4.45) para FAI-FFFT em linhas de transmissão trifásicas paralelas resulta que:

$$\mathbf{A}_{3PN-FFFT\Omega} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{3PN-FFFT\Omega}, \quad (4.67)$$

onde  $\Omega = \{a, b, c\}$  representa as fases envolvidas na falta.

Analogamente, substituindo cada conjunto de  $N$  fasores de tensões e correntes na expressão (4.67) escreve-se, para FAI-FFFT, a seguintes matrizes  $\mathbf{b}_{3PN-FFFT\Omega}$  e  $\mathbf{A}_{3PN-FFFT\Omega}$ :

$$\mathbf{b}_{3PN-FFFT} = \begin{bmatrix} V_{LRaa-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRbb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRcc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRaa-k} + l(z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRbb-k} + l(z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \\ V_{LRcc-k} + l(z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{Ra-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{Rb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{Rc-k}) \end{bmatrix}, \quad (4.68)$$

$$\mathbf{A}_{3PN-FFFT} = \begin{bmatrix} z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{aa} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{ab} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{ac} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ba} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{bb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{bc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \\ z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} + z_{ca} \mathbf{I}_{LRaa-k} + z_{cb} \mathbf{I}_{LRbb-k} + z_{cc} \mathbf{I}_{LRcc-k} \end{bmatrix}. \quad (4.69)$$

Portanto, define-se a expressão para localização de FAI-FFFT utilizada para estimar a distância da falta a partir do MMQ.

De forma equivalente ao observado para linhas de transmissão simples, as expressões acima descritas para FAI-FT e FAI-FFT são casos particulares das equações (4.67), (4.68) e (4.69), haja vista que o estudo contempla as faltas à terra.

A solução para a estimativa da distância da falta, considerando-se as expressões (4.52), (4.60) e (4.67), é obtida segundo a abordagem proposta e aplicando-se o MMQ conforme:

$$\hat{x}_K = \left( \left| \mathbf{A}_{3PN-K} \right|^T \left| \mathbf{A}_{3PN-K} \right| \right)^{-1} \left| \mathbf{A}_{3PN-K} \right|^T \mathbf{b}_{3PN-K}, \quad (4.70)$$

onde  $K = \{FT\Omega, FFT\Omega, FFFT\Omega\}$  representa os tipos de faltas.

#### 4.4 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA: DOIS EXEMPLOS

Para ilustrar as asserções descritas nas Seções 4.1.1 e 4.1.3 são apresentados dois exemplos envolvendo LDFAI. Para isso, foram simuladas FAI fase-terra nos programas ATP e Matlab, considerando-se uma linha de transmissão trifásica simples de 230 kV e 80 km de comprimento. As FAI foram simuladas na barra do terminal remoto, ou seja, uma falta com valor de referência de 80 km. A taxa de amostragem utilizada é de 20 amostras / ciclo.

O primeiro exemplo consiste de uma análise considerando-se uma FAI-FTa momentânea, sendo sua localização estimada segundo duas abordagens: empregando-se as expressões (4.26) e (4.44), na primeira abordagem, e a expressão (4.25), para a segunda. Como a falta considerada é momentânea e  $N = 20$  amostras / ciclo, foram calculados 20 conjuntos de fasores de  $V_L$ ,  $V_R$ ,  $I_L$  e  $I_R$  a partir da primeira amostra do segundo ciclo após a detecção da FAI, conforme descrito na subseção 4.1.2.

Na primeira abordagem, tais conjuntos de fasores foram aplicados na expressão (4.26), sendo a distância da falta estimada segundo a expressão (4.44), resultando em um erro relativo de 0,125 %.

Na segunda abordagem, foram aplicados cada um dos 20 conjuntos de fasores na expressão (4.25), resultando, desta forma, em 20 diferentes valores de distância de falta. A Figura 4.8 apresenta os erros relativos da estimativa da distância da falta em função das amostras em que foram calculados os fasores utilizados na equação (4.25).

Observa-se na Figura 4.8 uma apreciável variação nos erros relativos calculados, como resultado de distintas estimativas da distância da falta. Este exemplo evidencia, mesmo que para um caso particular, a validade da abordagem empregando-se o MMQ, que é a proposta desta tese.

O segundo exemplo contempla a análise de uma FAI-FTa permanente de 29 ciclos com  $N = 20$  amostras / ciclo. Para este caso foram estimados 20 conjuntos de fasores de  $V_L$ ,  $V_R$ ,  $I_L$  e  $I_R$  para cada um dos 28 ciclos da falta. Cada um desses 20 conjuntos de fasores foi aplicado sequencialmente na expressão (4.25). Tal procedimento resultou na estimativa de 520 distâncias de falta. A Figura 4.9 apresenta os erros relativos para consecutivas estimativas da distância de falta em função das amostras em que foram calculados os fasores utilizados na equação (4.25).

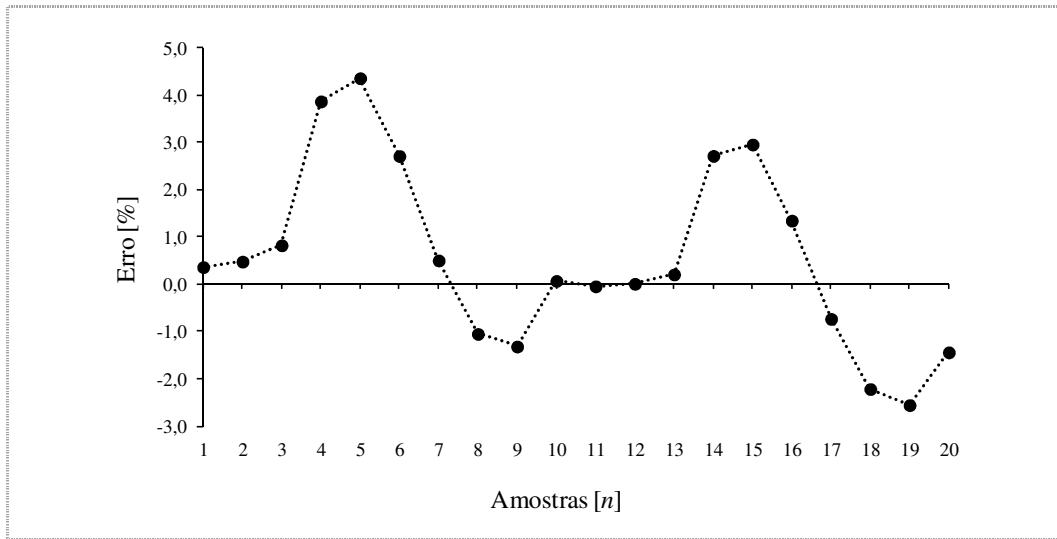


Figura 4.8 - Erros relativos considerando consecutivas estimativas da distância de falta em 1 ciclo.  
Fonte: O autor (2014).

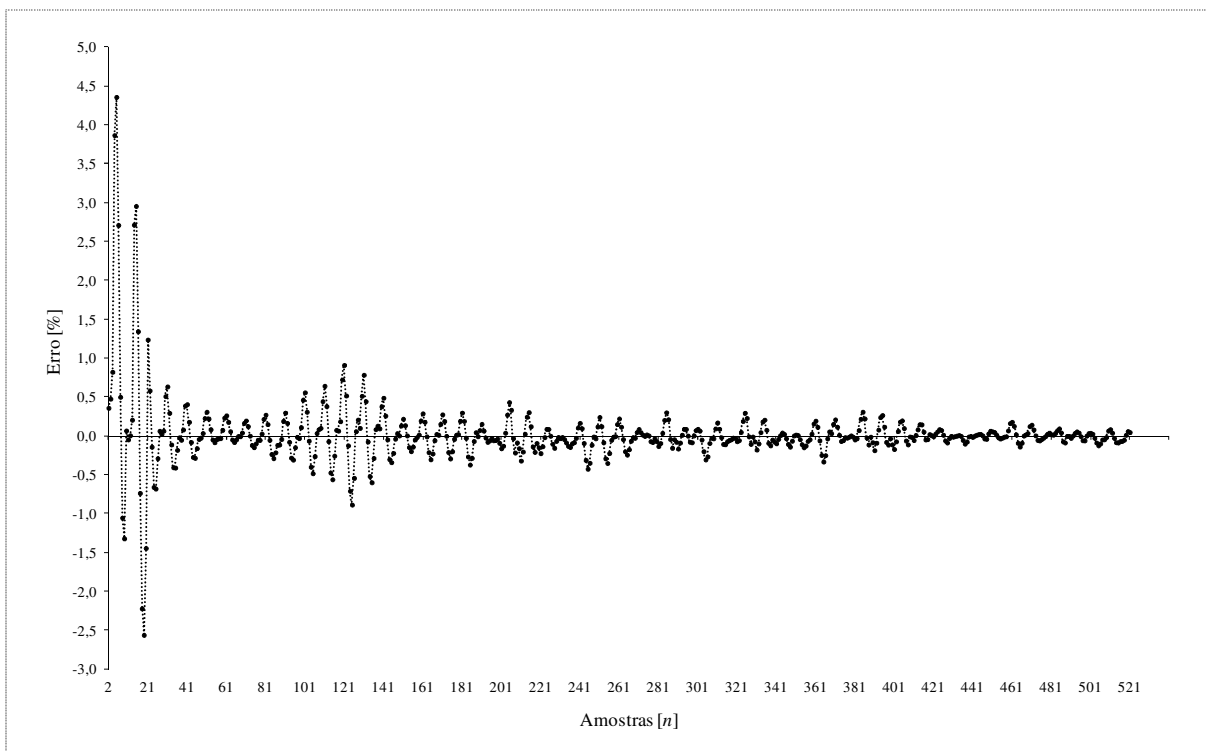


Figura 4.9 - Erros relativos considerando consecutivas estimativas da distância de falta em 28 ciclos.  
Fonte: O autor (2014).

A partir da Figura 4.9 é possível concluir que os erros relativos das estimativas da distância da falta são maiores no início da FAI e reduzem-se significativamente no regime permanente da FAI. Desta forma, o objetivo desse segundo exemplo é evidenciar a influência e os efeitos das características deste tipo de falta na estimativa dos fasores utilizados nas equações de LDFAI.

#### 4.5 ALGORITMO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Inevitavelmente a aplicação de uma técnica ou do respectivo algoritmo de LDF requer previamente a detecção da falta a ser localizada. A Figura 4.10 retrata, por meio de um diagrama de blocos simplificado, as etapas que compõem o caminho a ser percorrido até a obtenção da estimativa da distância da falta.

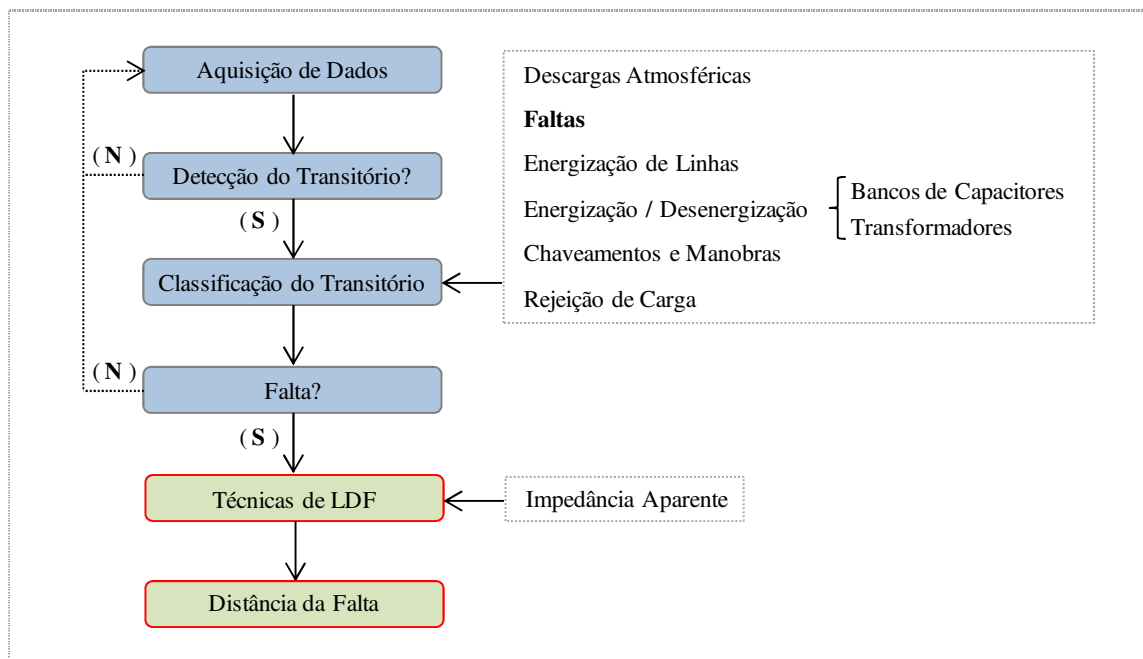


Figura 4.10 - Diagrama de blocos simplificado das etapas para estimar a distância da falta.  
Fonte: O autor (2014).

A primeira etapa de um esquema de LDF consiste na aquisição de dados, em que estes são obtidos a partir do registro das oscilações de grandezas elétricas do sistema, como tensões e correntes, gravadas em uma memória cíclica de um registrador de perturbações (MORETO; ROLIM, 2010). A segunda etapa consiste na detecção do transitório eletromagnético e caracteriza-se pela determinação do instante em que este ocorre. Podendo, para isso, serem aplicadas as abordagens propostas por (FERRAZ *et al.*, 2012; LOPES; FERNANDES JR; NEVES, 2013). A terceira etapa tem como objetivo classificar as perturbações que ocorrem durante a operação do SEP, permitindo, por exemplo, diferenciar o transitório gerado por uma falta de transitórios originados por manobras no sistema. Os trabalhos de (BOLLEN; STYVAKTAKIS; GU, 2005; SILVA *et al.*, 2007) abordam especificamente a classificação de transitórios em SEP.

Devido às limitações dos objetivos desta tese, extensão e complexidade, as etapas de *Aquisição de Dados*, *Detecção e Classificação de Transitórios* não compreendem o foco deste estudo. Desta forma, na aplicação da técnica de LDFAI proposta considera-se que tais etapas foram cumpridas com êxito.

A partir das condições de que os sinais de tensões e correntes foram registrados e a falta detectada, o algoritmo para LDFAI, considerando a técnica proposta, pode ser dividido nos seguintes passos:

- i. determinação do período durante a falta, amostra inicial ( $n_{\text{início}}$ ) e amostra final ( $n_{\text{fim}}$ );
- ii. classificação do tipo de falta, momentânea ou permanente, e determinação da amostra de referência  $n_0$ , considerando-se que:
  - para falta momentânea:  $n_0 = n_{\text{início}} + 1 * N$ ;
  - para falta permanente:  $n_0 = n_{\text{fim}} - 3 * N$ ;
- iii. cálculo dos fasores de tensões e correntes;
- iv. determinação do tipo de falta: FT, FFT ou FFFT;
- v. determinação da(s) fase(s) envolvida(s) na falta;
- vi. estimativa da distância da falta utilizando o estimador de mínimos quadrados.

O fluxograma retratado na Figura 4.11 descreve o algoritmo de LDFAI proposto, que embora esteja descrito para linhas de transmissão simples, os procedimentos são os mesmos para linhas de transmissão paralelas, considerando-se as equações adequadas descritas na Seção 4.3.

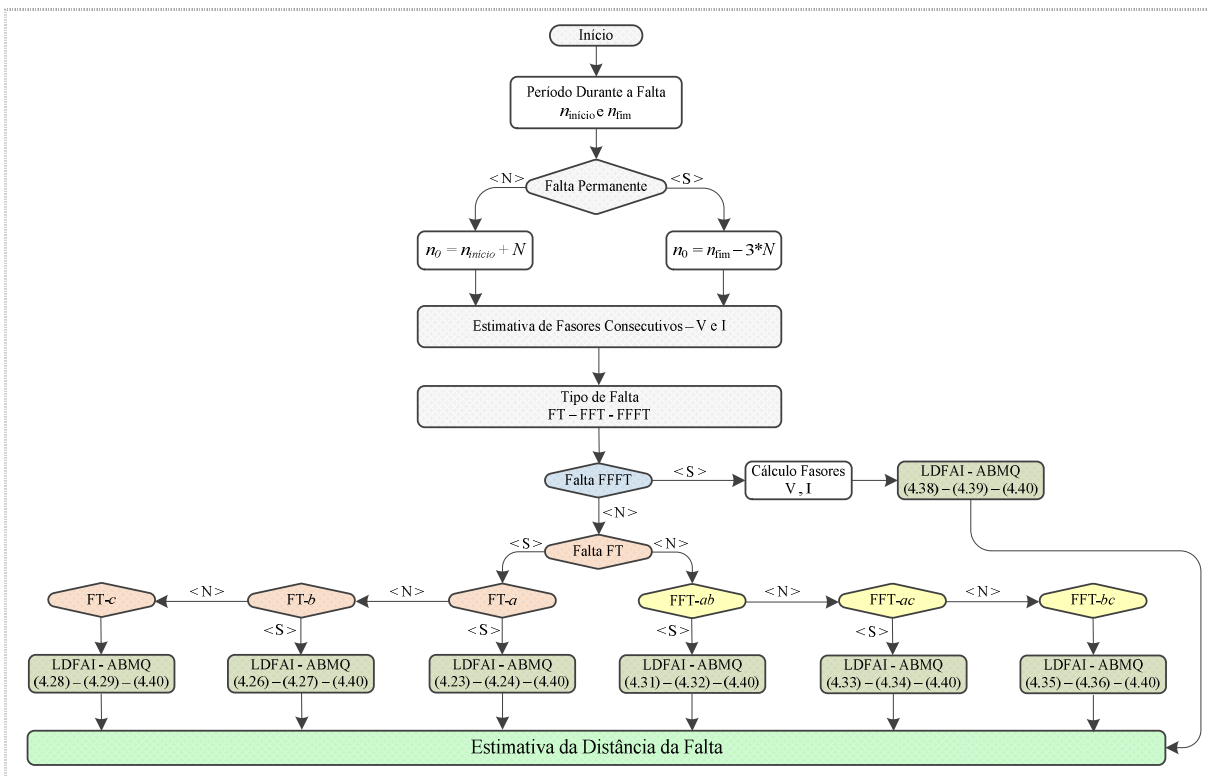


Figura 4.11 - Fluxograma do algoritmo de LDFAI proposto para linhas de transmissão simples.  
Fonte: O autor (2014).



#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse Capítulo foi apresentada uma nova técnica para LDFAI em linhas de transmissão fundamentada nos métodos da impedância aparente e mínimos quadrados. Foram desenvolvidas equações para FAI do tipo monofásicas, bifásicas e trifásicas à terra, com uma formulação matemática em componentes de fase, o que permite a validade da abordagem proposta, frente ao uso de componentes simétricas, para linhas de transmissão simples e paralelas, transpostas ou não.

A partir da estimativa de consecutivos fasores de tensões e correntes em ambos os terminais da linha de transmissão, a técnica de LDFAI proposta está baseada na solução de um sistema sobredeterminado de equações lineares aplicando-se o MMQ, cujo objetivo é determinar a melhor estimativa da distância da falta.

Além disso, a apresentação de dois exemplos permitiu verificar a influência e os efeitos das características de uma FAI na estimativa da distância da falta, considerando-se faltas momentâneas e permanentes. Nesses exemplos, a aleatoriedade nos erros relativos calculados, como resultado de distintas estimativas da distância da falta, decorre principalmente da consideração, no modelo da FAI utilizado, de uma resistência que varia com o tempo, para diferentes superfícies de contato.

O Capítulo seguinte apresenta os estudos de casos e os resultados obtidos na aplicação da técnica de LDFAI proposta. Divididos em três grupos (análise de sensibilidade, análise comparativa e casos reais), os estudos de casos têm como objetivo a validação da abordagem proposta.



## 5 ESTUDOS DE CASOS E RESULTADOS

Neste Capítulo serão apresentados os estudos de casos realizados e os resultados obtidos na estimativa da distância da falta usando a técnica de LDFAI descrita no Capítulo 4.

### 5.1 ESTUDOS DE CASOS: DESCRIÇÕES

Com o objetivo de avaliar o desempenho da abordagem de LDFAI proposta, os estudos de casos serão divididos em três grupos: análise de sensibilidade, análise comparativa e casos reais, descritos a seguir. Como a técnica de LDFAI proposta é aplicada a linhas de transmissão com dados sincronizados de ambos os terminais, para os casos simulados, esses dados foram obtidos a partir de simulações realizadas no programa ATP e aplicados no algoritmo de LDFAI implementado no programa computacional Matlab (MATLAB, 2010).

Além dos fatores específicos que serão descritos em cada grupo dos estudos de casos, as simulações foram realizadas considerando as seguintes condições:

- três tipos de faltas à terra: FAI-FT<sub>a</sub>, FAI-FFT<sub>ab</sub> e FAI-FFFT;
- FAI momentâneas e permanentes;
- linhas de transmissão trifásicas simples e paralela;
- FAI propositalmente inseridas a 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% do comprimento da linha de transmissão, totalizando 11 pontos de faltas.

A Figura 5.1 descreve o diagrama do SEP que será utilizado nos estudos de casos, com FAI simuladas entre as Barras L e R, denominadas barras local e remota, respectivamente.

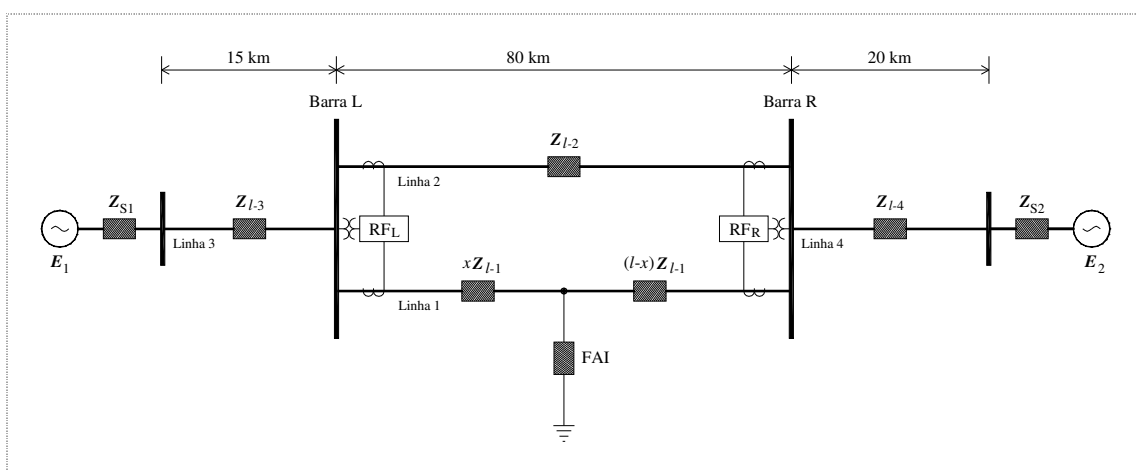


Figura 5.1 - Diagrama do sistema de potência usado nas simulações.

Fonte: O autor (2014).

Em que  $Z_{l-1}$ ,  $Z_{l-2}$ ,  $Z_{l-3}$  e  $Z_{l-4}$  são as impedâncias das linhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente;  $Z_{S1}$  e  $Z_{S2}$  são as impedâncias equivalentes de Thévenin dos sistemas 1 e 2, respectivamente;  $E_1$

e  $E_2$  são as fontes de tensões atrás das impedâncias equivalentes dos sistemas 1 e 2, respectivamente. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros do SEP retratado na Figura 5.1 que serão usados nas simulações.

Tabela 5.1 - Parâmetros do sistema de potência usado nas simulações.

Frequência do Sistema 60 Hz		Linhas de Transmissão	
Fonte 1	Fonte 2	Impedâncias de Fase - $Z_l$	
$E_1 = 229,174 \angle 0^\circ$ [kV]	$E_2 = 228,353 \angle \varphi_2$ [kV]	$Z_{l_{aa}} = 0,1137+j0,7685$ [ $\Omega$ /km]	$Z_{l_{ab}} = 0,0549+j0,3654$ [ $\Omega$ /km]
$Z_{S11} = Z_{S12} = 0,238+j5,7132$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S21} = Z_{S22} = 0,238+j6,19$ [ $\Omega$ ]	$Z_{l_{bb}} = 0,1137+j0,7685$ [ $\Omega$ /km]	$Z_{l_{ac}} = 0,0553+j0,3127$ [ $\Omega$ /km]
$Z_{S10} = 2,738+j10$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S20} = 0,833+j5,118$ [ $\Omega$ ]	$Z_{l_{cc}} = 0,1137+j0,7685$ [ $\Omega$ /km]	$Z_{l_{bc}} = 0,0557+j0,3644$ [ $\Omega$ /km]

As impedâncias das linhas de transmissão, mostradas na Tabela 5.1, foram calculadas a partir das equações modificadas de Carson (ANDERSON, 1973; KERSTING, 2002), considerando-se a resistividade do solo constante ( $\rho = 100 \Omega \cdot m$ ), a frequência nominal do sistema ( $f = 60$  Hz), a topologia das linhas (conforme a Tabela 5.2) e as características dos condutores utilizados (cabo *grosbeak* 1x636 MCM). O efeito do condutor de guarda foi incorporado às fases a partir do método de redução de Kron (KRON, 1952), reduzindo a matriz de impedância à ordem  $3 \times 3$ .

Tabela 5.2 - Distâncias entre condutores na estrutura de sustentação da linha de transmissão.

Fase	Distância Horizontal [m]	Altura na Torre [m]	Altura a Meio Vão [m]
<i>a</i>	0,00	30,48	22,25
<i>b</i>	0,00	25,45	17,22
<i>c</i>	0,00	20,42	12,19
<i>a</i>	8,84	30,48	22,25
<i>b</i>	8,84	25,45	17,22
<i>c</i>	8,84	20,42	12,19

Para as simulações de FAI em uma linha de transmissão trifásica simples, considera-se que a linha 2 encontra-se desconectada das Barras R e L, com ambos os terminais aterrados.

## 5.1.1 Descrições dos Estudos de Casos

### 5.1.1.1 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste na avaliação da influência das variações dos parâmetros que direta ou indiretamente compõem as equações de LDFAI apresentadas no Capítulo 4. Assim, para análise de sensibilidade da técnica de LDFAI proposta serão consideradas variações nos parâmetros apresentados a seguir.

#### A. Modelo da FAI - ângulo $\theta$

No modelo de FAI proposto por (EMANUEL *et al.*, 1990), a terceira harmônica da corrente é função principalmente da  $\tan(\theta)$ , em que  $\theta = \tan^{-1}(X_F / R_F)$ . Desta forma, para avaliar o desempenho da técnica proposta na presença de harmônicas de terceira ordem, geradas pela ocorrência da FAI, serão considerados os valores de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$  para o ângulo  $\theta$ , no período permanente da falta.

#### B. Modelo da FAI - $V_n$ e $V_p$

A partir de resultados experimentais, no modelo de FAI proposto por (EMANUEL *et al.*, 1990), a segunda harmônica da corrente é função sobretudo de  $\Delta V = V_n - V_p$ . Assim, para avaliar o comportamento da abordagem proposta na presença de segunda harmônica serão consideradas as combinações dos seguintes conjuntos de tensões:  $V_n = \{-66,67, -80\}$  e  $V_p = \{66,67, 80\}$ , ambos em quilovolts.

#### C. Impedâncias equivalentes de Thévenin

As impedâncias equivalentes, denominadas  $Z_{S1}$  e  $Z_{S2}$ , determinam na verdade a capacidade de curto-circuito dos sistemas 1 e 2, respectivamente, mostrados na Figura 5.1. Normalmente, as técnicas de LDF fundamentadas na impedância aparente, tal como a apresentada em (IBRAHIM *et al.*, 2010), utilizam valores pré-calculados de impedâncias equivalentes. No entanto, estes valores podem variar consideravelmente ao longo de um dia de operação do SEP. Desta forma, considera-se importante avaliar a influência das variações desses parâmetros na técnica de LDFAI. Para isso, serão consideradas as seguintes relações de impedâncias equivalentes:  $Z_{S2} = 1,2 * Z_{S1}$ ,  $Z_{S2} = Z_{S1}$ ,  $Z_{S2} = 0,8 * Z_{S1}$  e  $Z_{S2} \neq Z_{S1}$ , que são os valores apresentados na Tabela 5.1.

#### D. Impedâncias da linha de transmissão

Conforme descrito no Capítulo 2, o desempenho das técnicas de LDF baseadas na impedância aparente depende da precisão no cálculo das impedâncias da linha de transmissão. Desta forma, para avaliar o desempenho da técnica proposta frente às variações desses parâmetros serão considerados erros de  $\pm 10\%$  nos valores das impedâncias da linha de transmissão utilizadas nas simulações.

#### E. Fluxo de potência ativa na linha de transmissão

A influência das variações nos fluxos de potência ativa, bem como o sentido do fluxo entre as Barras L e R, na técnica de LDFAI apresentada será avaliada a partir de mudanças no ângulo  $\phi_2$  da fonte de tensão 2, mostrado na Tabela 5.1, considerando-se os seguintes

valores:  $\varphi_2 = 16,3^\circ$  (carga leve),  $\varphi_2 = 21,8^\circ$  (carga média) e  $\varphi_2 = 27,4^\circ$  (carga pesada). Sendo que as cargas leve, média e pesada equivalem a 60%, 80% e 100% da capacidade de transmissão da linha, respectivamente.

#### F. Ângulo de incidência da falta

O ângulo de incidência corresponde ao instante em que uma falta ocorre em uma determinada fase do sistema. Desta forma, para avaliar a influência deste parâmetro serão considerados os seguintes ângulos:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$  em relação à onda de tensão da fase  $a$ , considerando-se uma função cosseno.

#### G. Superfície de contato no ponto da falta

Uma FAI pode resultar do contato de condutores energizados com diferentes superfícies, originando distintos comportamentos das correntes de falta ao longo do tempo. Assim, o desempenho da abordagem proposta será avaliado a partir da consideração de cinco tipos de superfícies de contato (solo local, árvore, asfalto, areia e grama), definidas no Capítulo 2.

#### H. Taxa de amostragem

A taxa de amostragem dos sinais das tensões e correntes registrados nas barras local e remota é um parâmetro que depende da capacidade e tecnologia do RF instalado nas barras do SEP. Assim, para contemplar tanto registradores digitais de faltas quanto relés digitais de proteção, a influência da variação da taxa de amostragem será avaliada considerando-se os seguintes valores: 20, 64 e 128 amostras / ciclo.

Assim sendo, as variações nos parâmetros acima descritos, para análise de sensibilidade da técnica proposta, resulta em oito casos (Casos I a VIII). Os valores de cada parâmetro para cada caso simulado são apresentados na Tabela 5.3.

#### 5.1.1.2 Análise Comparativa

A análise comparativa consiste em confrontar a técnica de LDFAI proposta que, por simplicidade, se denominará Abordagem Baseada em Mínimos Quadrados (ABMQ) com a técnica apresentada por (IBRAHIM *et al.*, 2010), que se designará Abordagem Baseada em Componentes de Sequências (ABCS). Consideradas as características descritas no Quadro 3.1, o trabalho de (IBRAHIM *et al.*, 2010) representa o estado da arte em LDFAI no domínio da frequência, com aplicações similares à abordagem proposta nesta tese.

Desta forma, para a análise comparativa de resultados entre a ABMQ e ABCS serão simuladas FAI FT-*a*, momentâneas e permanentes, em uma linha de transmissão simples, considerando as condições apresentadas na Tabela 5.4.

### 5.1.1.3 Casos Reais de Falhas de Alta Impedância

Diferentemente das condições de FAI simuladas, em que se tem pleno controle das variáveis de interesse, os casos reais apresentam todo um conjunto de características intrínsecas à operação de um SEP que, de alguma forma, pode influenciar no desempenho das técnicas de LDF. Desta forma, a consideração de FAI reais, mesmo que de maneira restrita, possibilita a avaliação da técnica de LDFAI proposta frente a variáveis que não foram contempladas nos casos simulados, tais como: os efeitos dos transdutores de corrente e potencial; os erros de medição dos registradores digitais; a influência do erro de sincronização de dados entre os terminais local e remoto, em decorrência da perda do sinal do GPS; imprecisão na determinação do instante de detecção da falta; correta seleção dos registros oscilográficos.

A seção subsequente apresenta os resultados dos estudos de casos considerando os erros percentuais em função da distância da falta, determinados segundo:

$$\text{Erro}[\%] = \frac{x_{\text{est}} [\text{km}] - x_{\text{ref}} [\text{km}]}{l_{\text{linha}} [\text{km}]} 100, \quad (5.1)$$

em que  $x_{\text{est}}$  é a distância estimada da falta em relação ao terminal local,  $x_{\text{ref}}$  é o valor de referência da distância da falta (valor verdadeiro) e  $l$  é o comprimento total da linha de transmissão.

Tabela 5.3 - Parâmetros usados nas simulações para análise de sensibilidade.

Caso	$V_p$ [kV]	$V_n$ [kV]	$\theta$	$Z_{linha}$	$R_f(t)$ [curva]	Parâmetros				AI	$\varphi_2$	TA	
						$Z_{S10}$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S11} = Z_{S12}$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S20}$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S21} = Z_{S22}$ [ $\Omega$ ]				
I	66,67	-80	0°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20	
			30°										
II	66,67	-66,67	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20	
													-80
													-66,67
III	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20	
													$Z_l^*1,1$
IV	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20	
													$Z_l^*0,9$
													2,738+j10
													2,738+j10
V	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20	
													0°
													180°
VI	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20	
													Árvore
													Asfalto
													Areia
VII	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	16,3°	20	
													27,4°
													-16,3°
													-27,4°
													20
VIII	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	64	
												128	

Notas:

TA: Taxa de Amostragem

AI: Ângulo de Incidência

Tabela 5.4 - Parâmetros usados nas simulações para análise comparativa.

Condição	$V_p$ [kV]	$V_n$ [kV]	$\theta$	$Z_{linha}$	$R_f(t)$ [curva]	Parâmetros				AI	$\varphi_2$	TA
						$Z_{S10}$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S11} = Z_{S12}$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S20}$ [ $\Omega$ ]	$Z_{S21} = Z_{S22}$ [ $\Omega$ ]			
I	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20
II	66,67	-80	15°	$Z_l^*1,1$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20
III	66,67	-80	15°	$Z_l$	Asfalto	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	21,8°	20
IV	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	3,2856+j12	0,2856+j6,855	90°	21,8°	20
V	66,67	-80	15°	$Z_l$	Solo local	2,738+j10	0,238+j5,7132	0,833+j5,118	0,238+j6,19	90°	27,4°	20



## 5.2 ESTUDOS DE CASOS: RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos estudos de casos decorrentes da utilização da técnica de LDFAI aplicada aos casos e condições descritas na seção anterior. Os resultados foram obtidos para FAI FT-*a*, FFT-*ab* e FFFT, momentâneas e permanentes, em linha simples e FAI FT-*a*, momentâneas e permanentes, em linha paralela para a análise de sensibilidade; FAI FT-*a*, momentâneas e permanentes, em linha simples para a análise comparativa e dois casos reais de FAI.

### 5.2.1 Análise de Sensibilidade: faltas momentâneas e permanentes em linha simples

Esta subseção apresentará os resultados dos estudos de casos relativos à análise de sensibilidade da ABMQ considerando FAI, momentâneas e permanentes, aplicadas na linha de transmissão trifásica simples retratada no diagrama da Figura 5.1.

#### 5.2.1.1 Falta Fase-Terra (FAI FT-*a*)

##### A. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: ângulo $\theta$

Para análise da influência do ângulo  $\theta$ , que é um dos parâmetros do modelo da FAI utilizado neste trabalho, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso I da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.2.

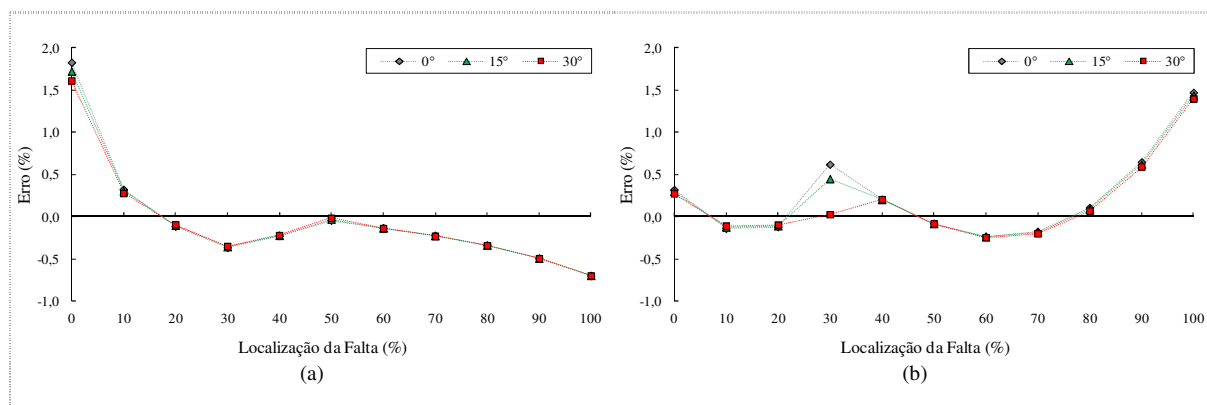


Figura 5.2 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo  $\theta$  - FAI FT-*a* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Analisando os resultados mostrados na Figura 5.2 é possível verificar que, tanto para FAI momentâneas quanto para FAI permanentes, as curvas dos erros percentuais são praticamente sobrepostas, o que permite concluir que a ABMQ não é sensível às variações no ângulo  $\theta$ . Observa-se ainda que os erros percentuais são praticamente nulos para FAI simuladas na

metade da linha de transmissão e não excedem 1,8% nos piores cenários, ou seja, para os casos de FAI localizadas nos extremos da linha de transmissão.

### B. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: $V_n$ e $V_p$

A Figura 5.3 apresenta os erros percentuais em função da distância da falta determinados nas simulações para o Caso II da Tabela 5.3, considerando a influência das variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$ , que também são parâmetros do modelo da FAI utilizado.

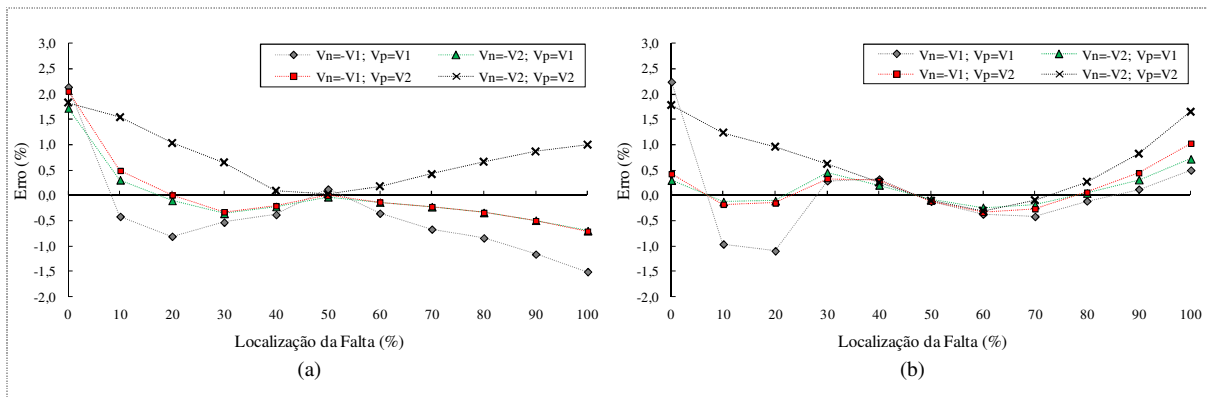


Figura 5.3 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$  - FAI FT-a em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

A partir dos resultados mostrados na Figura 5.3, observa-se que a ABMQ apresenta alguma sensibilidade às variações desses parâmetros, principalmente nas condições de FAI momentâneas. Contudo, os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas nos extremos da linha de transmissão e não ultrapassam 2,25% nos piores casos, sendo praticamente nulos para FAI simuladas na metade da linha.

### C. Influência das Impedâncias Equivalentes de Thévenin

A influência das impedâncias equivalentes de Thévenin pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.4, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso IV da Tabela 5.3.

A justaposição das curvas mostradas na Figura 5.4 indica que a ABMQ apresenta pouca sensibilidade às variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin. É importante notar que mesmo com modificações de  $\pm 20\%$  nos valores das impedâncias equivalentes, os erros percentuais máximos não excedem 2,25%, particularmente para faltas simuladas nas barras do SEP utilizado.

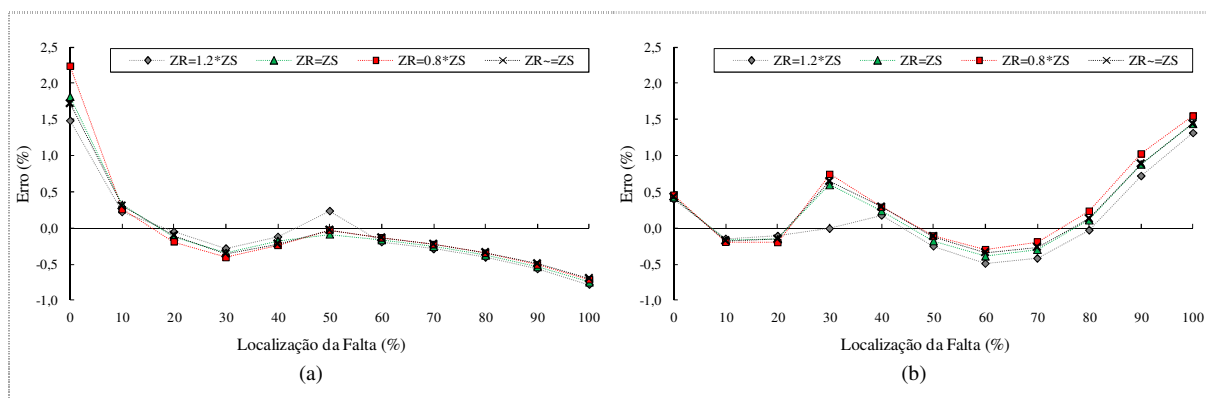


Figura 5.4 -Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FT-a em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

#### D. Influência das Impedâncias da Linha de Transmissão

A Figura 5.5 mostra os erros percentuais em função da distância da falta estabelecidos nas simulações para o Caso III da Tabela 5.3, levando em conta a influência das impedâncias da linha de transmissão.

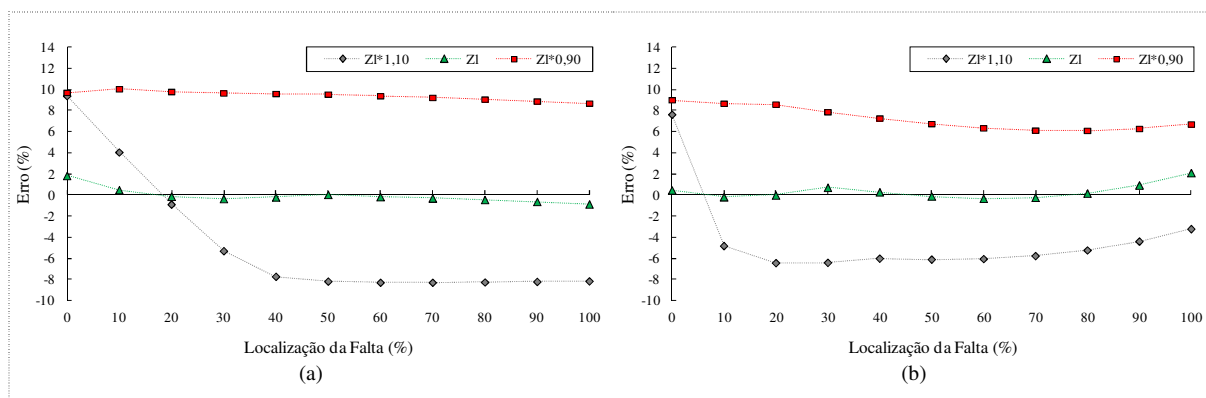


Figura 5.5 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FT-a em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Os resultados retratados na Figura 5.5, tanto para FAI momentâneas quanto para FAI permanentes, indicam que a ABMQ apresenta uma observável sensibilidade às variações nesses parâmetros. Nota-se que variações de  $\pm 10\%$  nos valores das impedâncias da linha de transmissão impõem erros absolutos máximos da ordem de 10% na estimativa da distância da falta.

#### E. Influência do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão

Para análise da influência do fluxo de potência ativa na linha de transmissão, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.6.

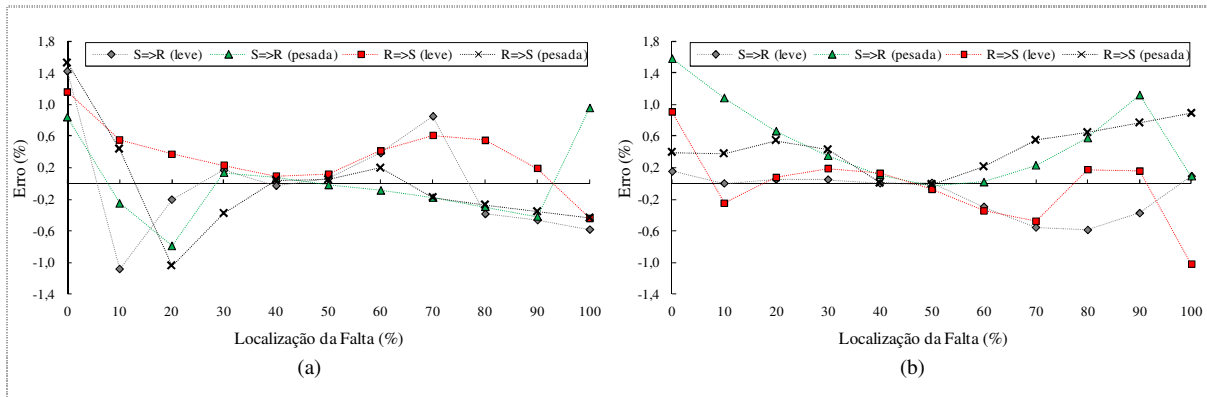


Figura 5.6 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FT-*a* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Os resultados retratados na Figura 5.6 mostram que a ABMQ apresenta uma perceptível sensibilidade às variações desses parâmetros. Contudo, os erros percentuais podem ser considerados nulos para FAI simuladas na metade da linha de transmissão e não ultrapassam valores absolutos da ordem de 1,6% nas condições de faltas simuladas nas barras do SEP utilizado.

#### F. Influência do Ângulo de Incidência da Falta

A influência do ângulo de incidência da falta pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.7, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso V da Tabela 5.3.

A sobreposição dos resultados mostrados na Figura 5.7, que ocorre na maioria das distâncias em que foram simuladas FAI, demonstra a influência mínima das variações dos ângulos de incidências considerados sobre a ABMQ. Observa-se que os erros absolutos máximos são da ordem de 2% e decorrem de FAI momentâneas simuladas na barra local.

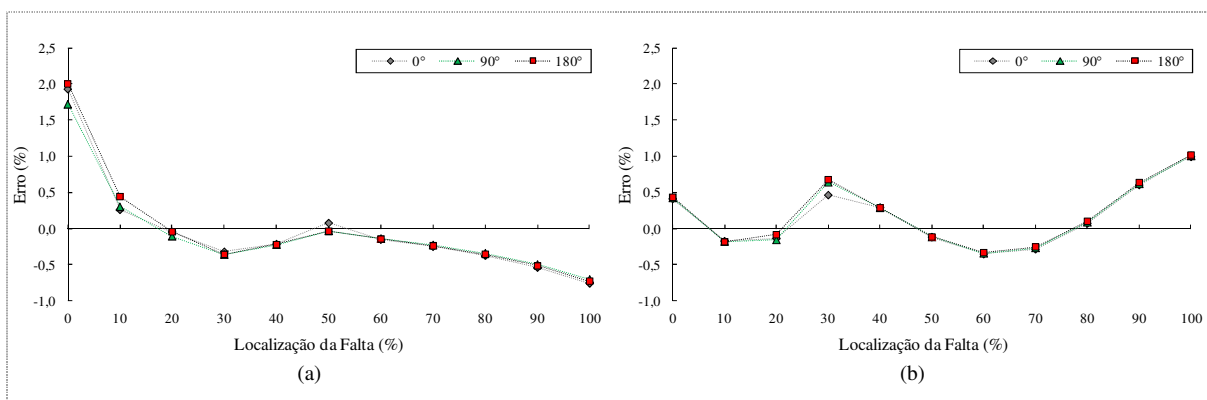


Figura 5.7 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FT-*a* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

### G. Influência da Superfície de Contato no Ponto da Falta

A Figura 5.8 mostra os erros percentuais em função da distância da falta determinados nas simulações para o Caso VI da Tabela 5.3, considerando a influência da superfície de contato no ponto da falta.

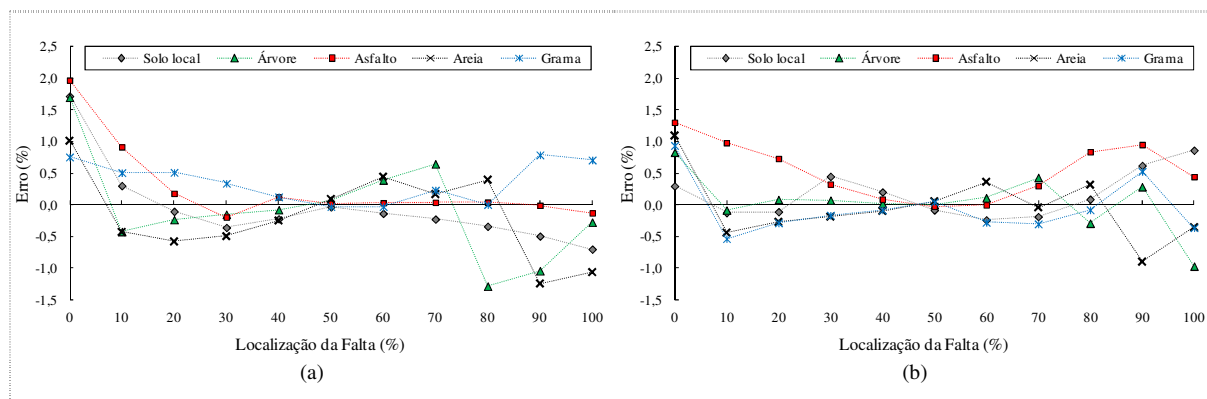


Figura 5.8 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FT- $a$  em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Observa-se nos resultados mostrados na Figura 5.8 que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações na superfície de contato no ponto da falta, particularmente para FAI permanentes. No entanto, os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas nos extremos da linha de transmissão e não excedem 2% nos piores cenários, sendo irrelevantes para FAI simuladas na metade da linha.

### H. Influência da Taxa de Amostragem

Para análise da influência da taxa de amostragem, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VIII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.9.

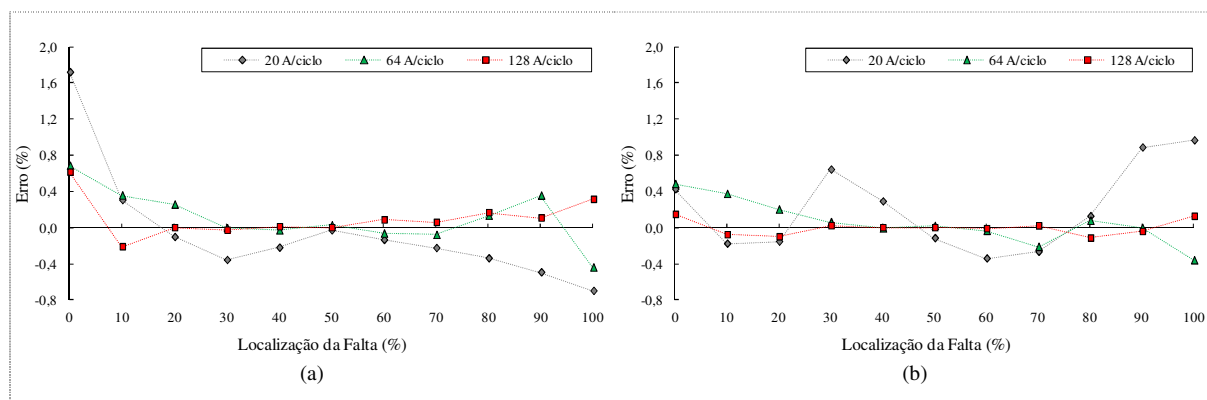


Figura 5.9 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FT- $a$  em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Os resultados exibidos na Figura 5.9 indicam que a ABMQ apresenta uma discreta sensibilidade às variações na taxa de amostragem dos sinais registrados nas barras local e remota. Em relação aos erros absolutos máximos, estes não excedem 1,8% para FAI nas piores condições simuladas, ou seja, para faltas nas barras local e remota, sendo inclusive próximos a zero para FAI simuladas na metade da linha de transmissão.

### 5.2.1.2 Falta Fase-Fase-Terra (FAI FFT-*ab*)

#### A. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: ângulo $\theta$

Para análise da influência do ângulo  $\theta$ , que é um dos parâmetros do modelo da FAI utilizado neste trabalho, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso I da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.10.

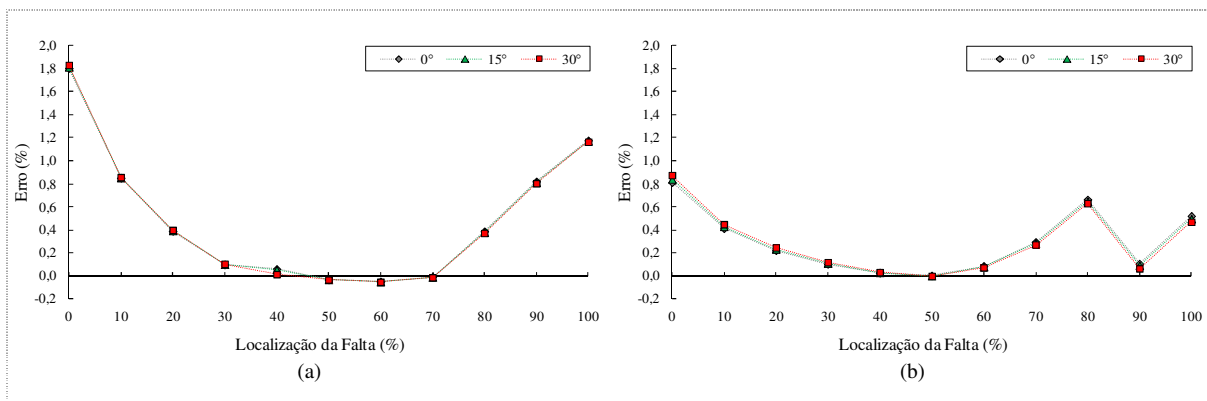


Figura 5.10 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo  $\theta$  - FAI FFT-*ab* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

A superposição das curvas dos erros percentuais mostradas na Figura 5.10, tanto para FAI momentâneas quanto para FAI permanentes, indica claramente que a ABMQ não é sensível às variações no ângulo  $\theta$ . Observa-se ainda que os erros absolutos máximos são da ordem de 1,8% para as piores condições simuladas, ou seja, para os casos de FAI localizadas nos extremos da linha de transmissão, sendo desprezíveis para FAI simuladas na metade da linha.

#### B. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: $V_n$ e $V_p$

A influência das variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$  do modelo de FAI considerado pode ser avaliada mediante os resultados dos erros percentuais em função da distância da falta mostrados na Figura 5.11, determinados nas simulações para o Caso II da Tabela 5.3.

Observa-se nos resultados mostrados na Figura 5.11 que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações desses parâmetros, particularmente para FAI permanentes.

No entanto, os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas nos extremos da linha de transmissão e não excedem 2,25% nos piores cenários, sendo desprezíveis para FAI simuladas na metade da linha.

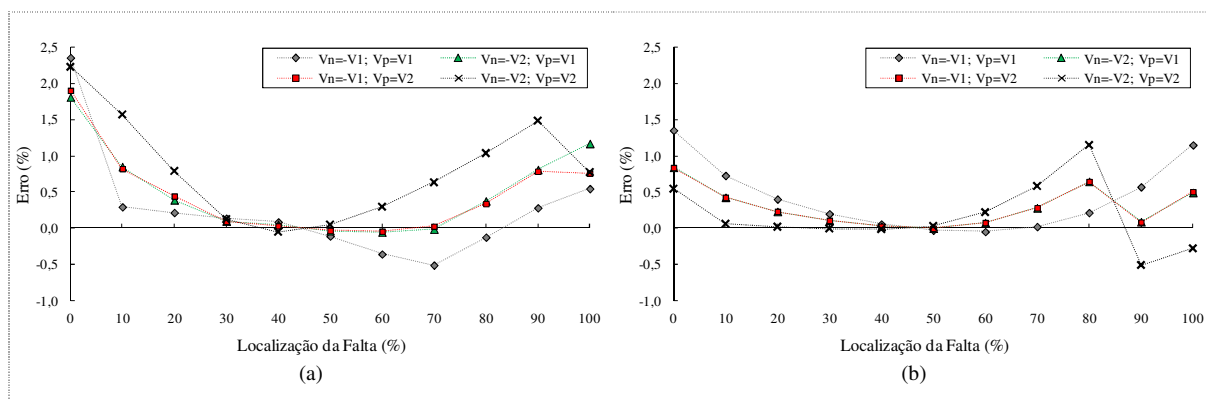


Figura 5.11 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$  - FAI FT- $ab$  em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

### C. Influência das Impedâncias Equivalentes de Thévenin

A influência das impedâncias equivalentes de Thévenin pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.12, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso IV da Tabela 5.3.

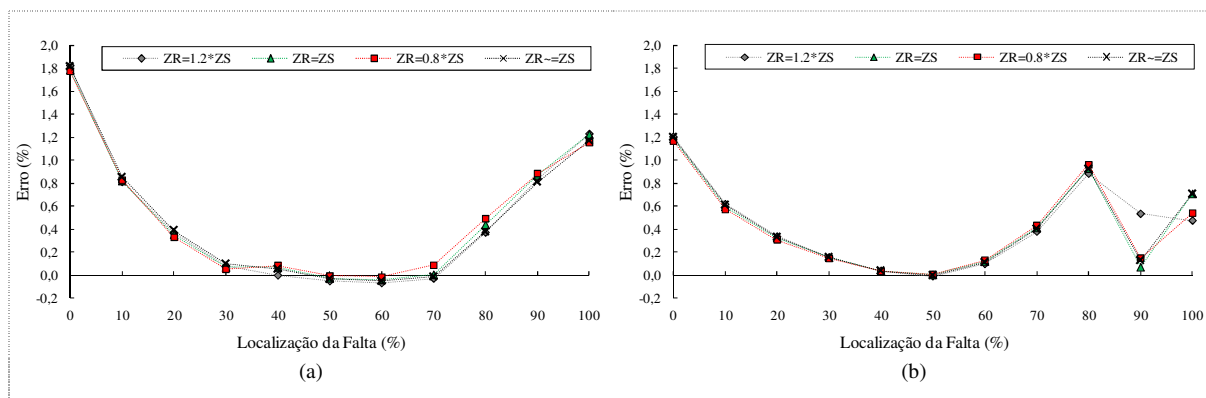


Figura 5.12 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FT- $ab$  em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Os resultados dos erros percentuais mostrados na Figura 5.12, retratados por curvas justapostas, evidenciam que a ABMQ apresenta pouca sensibilidade às variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin. Observa-se que tais resultados consideram variações de  $\pm 20\%$  nos valores das impedâncias equivalentes, sendo os erros percentuais máximos da ordem de 1,8%, particularmente para faltas simuladas nas barras do SEP utilizado.

#### D. Influência das Impedâncias da Linha de Transmissão

A Figura 5.13 mostra os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso III da Tabela 5.3, levando em conta a influência das impedâncias da linha de transmissão.

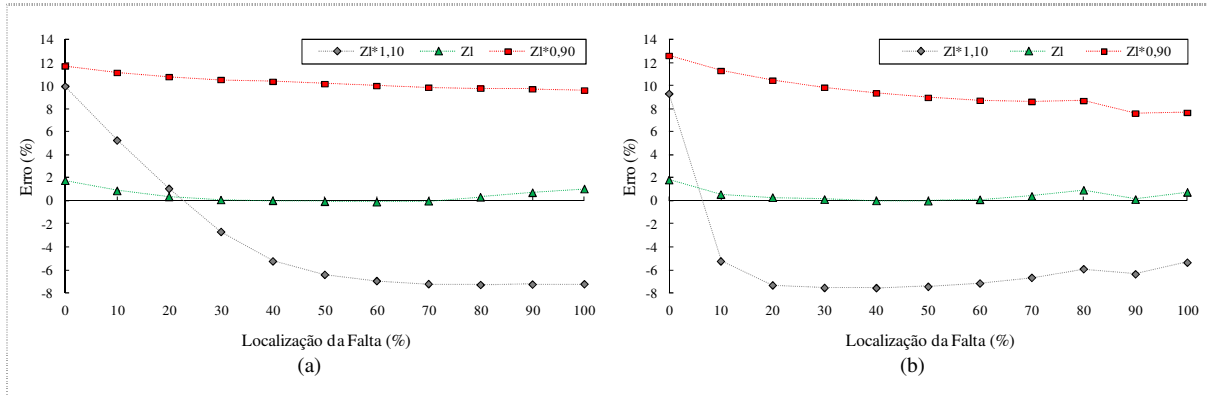


Figura 5.13 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FT-*ab* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Os resultados apresentados na Figura 5.13, tanto para FAI momentâneas quanto para FAI permanentes, mostram que a ABMQ apresenta uma perceptível sensibilidade às variações nas impedâncias da linha de transmissão. Observa-se que os erros absolutos máximos são da ordem de 12% e decorrem de variações de  $-10\%$  nos valores das impedâncias da linha.

#### E. Influência do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão

Para análise da influência do fluxo de potência ativa na linha de transmissão, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.14.

Observa-se na Figura 5.15 que a ABMQ mostra-se pouco sensível às variações desse parâmetro. Os erros percentuais são desprezíveis para FAI simuladas na metade da linha de transmissão e não ultrapassam valores absolutos da ordem de 1,6%, particularmente para condições de faltas simuladas nas barras do SEP utilizado.



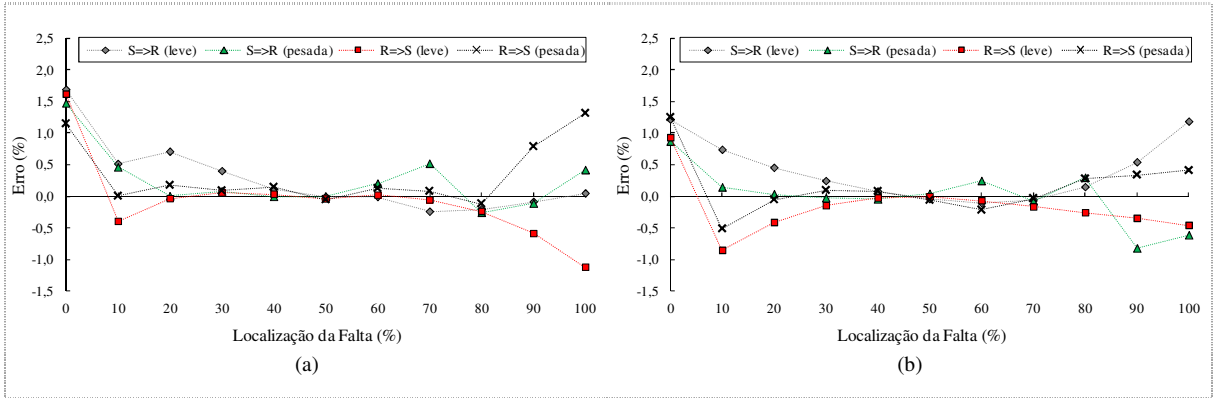


Figura 5.14 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FT-*ab* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

*F. Influência do Ângulo de Incidência da Falta*

A influência do ângulo de incidência da falta pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.15, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso V da Tabela 5.3.

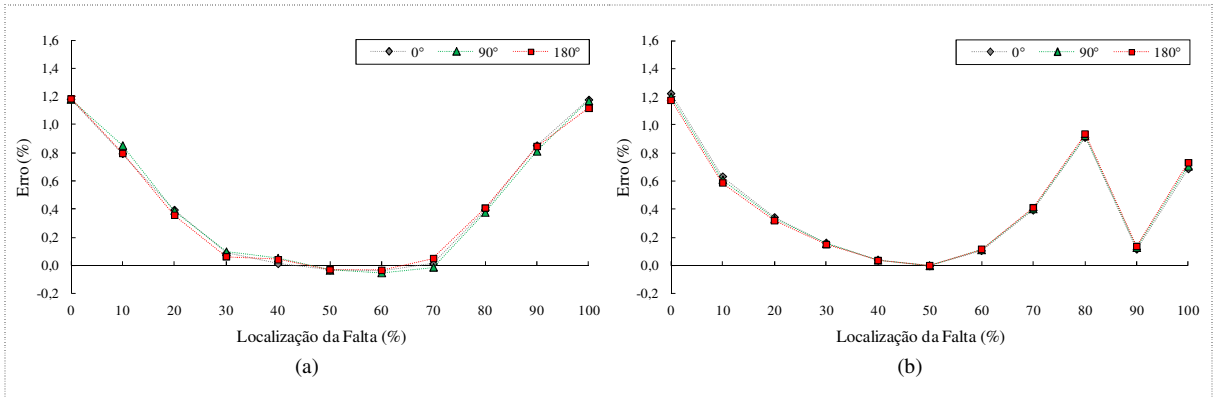


Figura 5.15 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FT-*ab* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

A sobreposição dos resultados mostrados na Figura 5.15 demonstra que a ABMQ não é sensível às variações nos ângulos de incidência considerados. Observa-se que os erros absolutos máximos são da ordem de 1,2% e estão relacionados às FAI momentâneas simuladas nas extremidades da linha de transmissão.

*G. Influência da Superfície de Contato no Ponto da Falta*

A Figura 5.16 mostra os erros percentuais em função da distância da falta determinados nas simulações para o Caso VI da Tabela 5.3, considerando a influência da superfície de contato no ponto da falta.

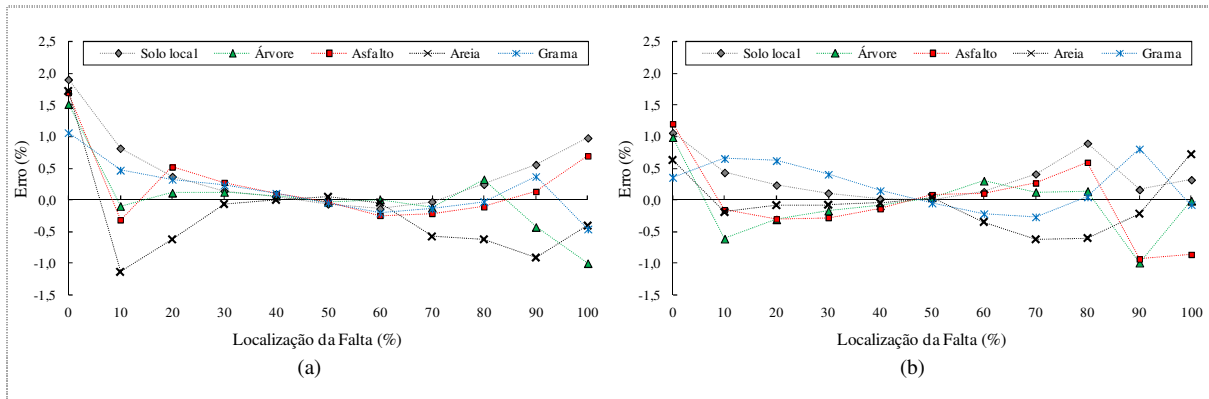


Figura 5.16 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FT-*ab* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Os resultados mostrados na Figura 5.16 indicam que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações na superfície de contato no ponto da falta. Todavia, os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas nos extremos da linha de transmissão e não excedem 2% nos piores cenários, sendo irrelevantes para FAI simuladas na metade da linha.

H. Influência da Taxa de Amostragem

Para análise da influência da taxa de amostragem, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VIII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.17.

Os resultados exibidos na Figura 5.17 mostram que a ABMQ possui uma discreta sensibilidade às variações na taxa de amostragem dos sinais registrados nas barras local e remota. Em relação aos erros absolutos máximos, estes não excedem 1,3% para FAI momentâneas simuladas na barra local, sendo inclusive próximos a zero para FAI simuladas na metade da linha de transmissão.

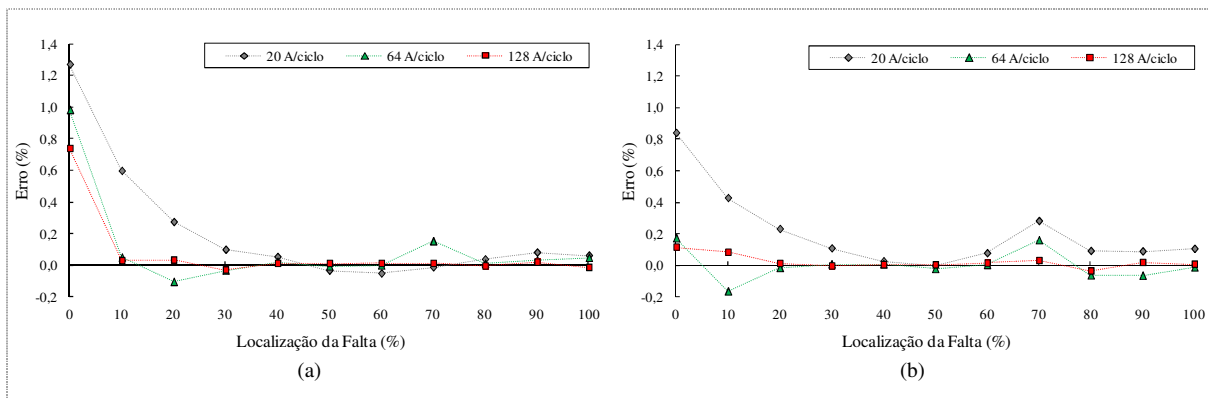


Figura 5.17 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FT-*ab* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

### 5.2.1.3 Falta Fase-Fase-Fase-Terra (FAI FFFT)

#### A. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: ângulo $\theta$

Para análise da influência do ângulo  $\theta$ , considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso I da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.18.

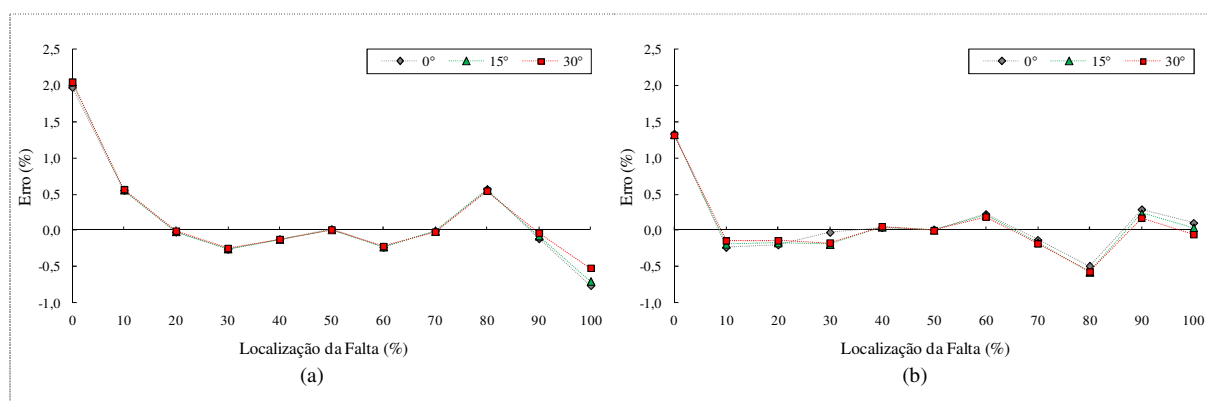


Figura 5.18 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo  $\theta$  - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Observa-se a partir dos resultados mostrados na Figura 5.18 que as curvas dos erros percentuais, tanto para FAI momentâneas quanto para FAI permanentes, são praticamente sobrepostas, o que indica que a ABMQ não é sensível às variações no ângulo  $\theta$ . Nota-se também que os erros relativos mais elevados são da ordem de 2% e resultam das simulações FAI momentâneas realizadas na barra local.

#### B. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: $V_n$ e $V_p$

A Figura 5.19 apresenta os erros percentuais em função da distância da falta determinados nas simulações para o Caso II da Tabela 5.3, considerando a influência das variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$ .

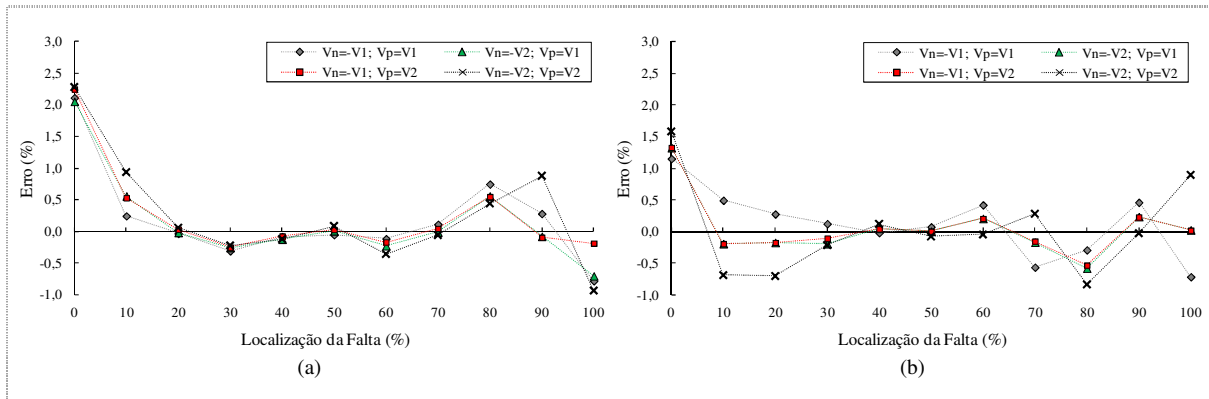


Figura 5.19 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$  - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Observa-se nos resultados mostrados na Figura 5.19 que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$ . No entanto, os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas na barra local e não excedem 2,25% nos piores cenários, sendo irrelevantes para FAI simuladas na metade da linha.

C. *Influência das Impedâncias Equivalentes de Thévenin*

A influência das impedâncias equivalentes de Thévenin pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.20, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso IV da Tabela 5.3.

A justaposição das curvas mostradas na Figura 5.20 permite concluir que a ABMQ apresenta pouca sensibilidade às variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin. Nota-se ainda que mesmo com alterações de  $\pm 20\%$  nos valores das impedâncias equivalentes, os erros percentuais máximos são da ordem de 2%, particularmente para faltas simuladas na barra local do SEP utilizado.

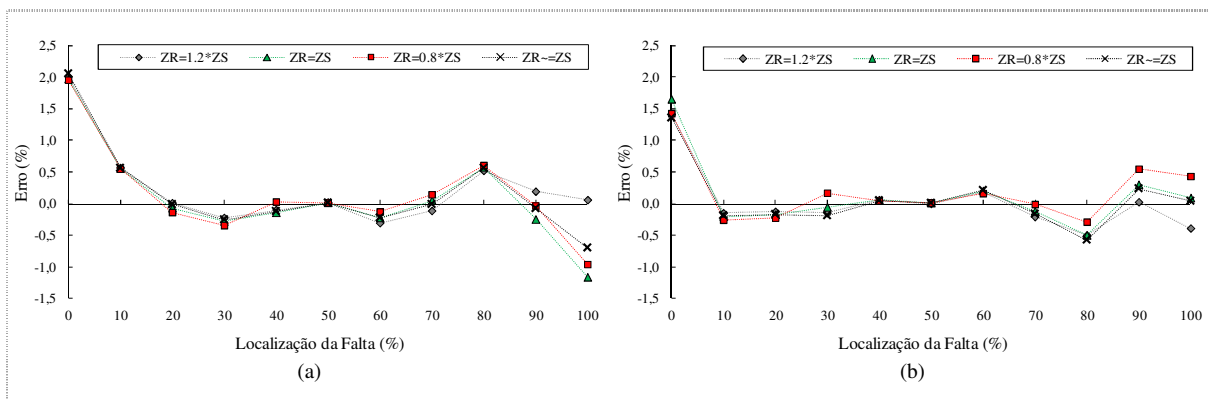


Figura 5.20 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

#### D. Influência das Impedâncias da Linha de Transmissão

A Figura 5.21 mostra os erros percentuais em função da distância da falta, que resultam das simulações para o Caso III da Tabela 5.3, levando em conta a influência das impedâncias da linha de transmissão.

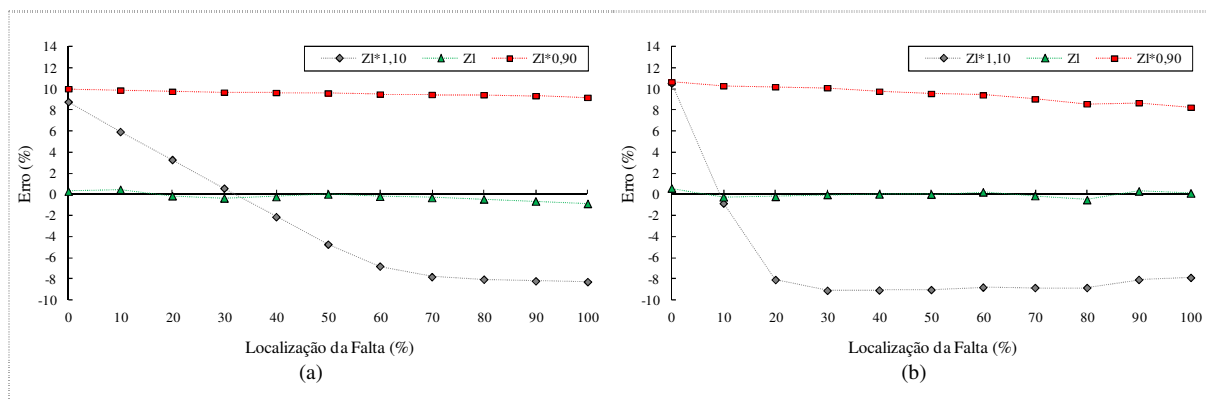


Figura 5.21 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Os resultados retratados na Figura 5.21, tanto para FAI momentâneas quanto para FAI permanentes, indicam que a ABMQ apresenta uma razoável sensibilidade às variações nesses parâmetros. Nota-se que variações de  $\pm 10\%$  nos valores das impedâncias da linha de transmissão impõem erros absolutos máximos da ordem de  $10\%$  na estimativa da distância da falta.

#### E. Influência do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão

Para análise da influência do fluxo de potência ativa na linha de transmissão, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.22.

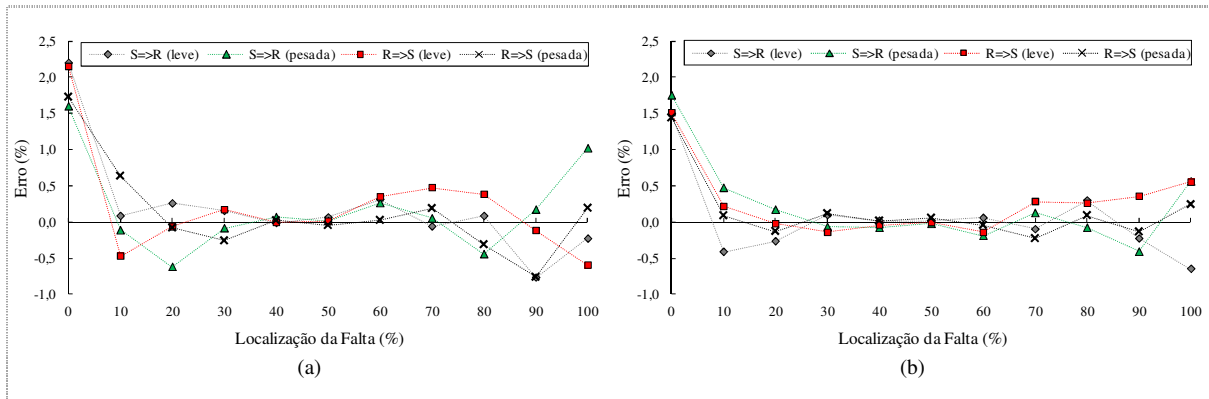


Figura 5.22 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Os resultados retratados na Figura 5.4 mostram que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações desses parâmetros, particularmente para as condições em que são consideradas FAI permanentes. Os erros percentuais podem ser considerados nulos para FAI simuladas na metade da linha de transmissão e não ultrapassam valores absolutos da ordem de 2,25% nas condições de faltas simuladas nas barras do SEP utilizado.

F. Influência do Ângulo de Incidência da Falta

A influência do ângulo de incidência da falta pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.23, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso V da Tabela 5.3.

A sobreposição dos resultados mostrados na Figura 5.23, que ocorre na maioria das distâncias em que foram simuladas FAI, demonstra a influência mínima das variações dos ângulos de incidências considerados sobre a ABMQ. Observa-se que os erros absolutos máximos são da ordem de 2% e decorrem de FAI momentâneas simuladas na barra local.

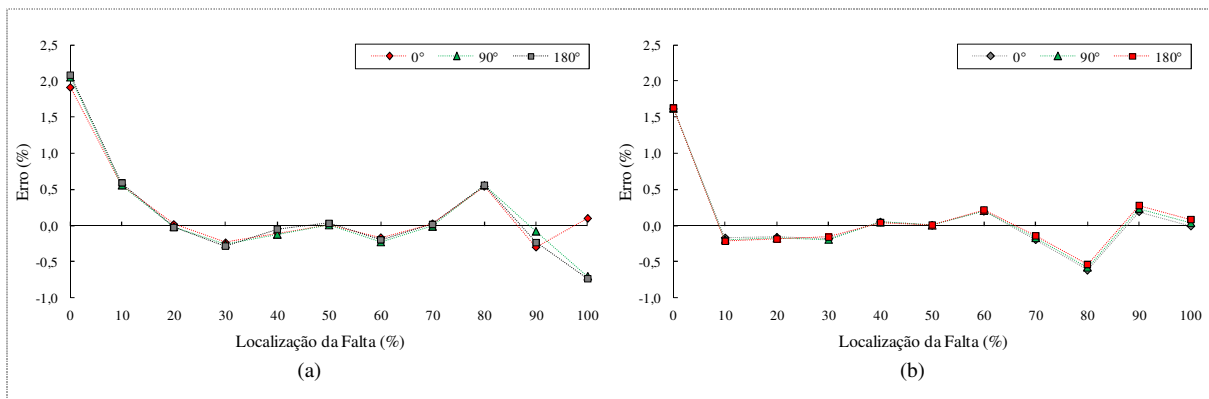


Figura 5.23 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

### G. Influência da Superfície de Contato no Ponto da Falta

A Figura 5.24 mostra os erros percentuais em função da distância da falta determinados nas simulações para o Caso VI da Tabela 5.3, considerando a influência da superfície de contato no ponto da falta.

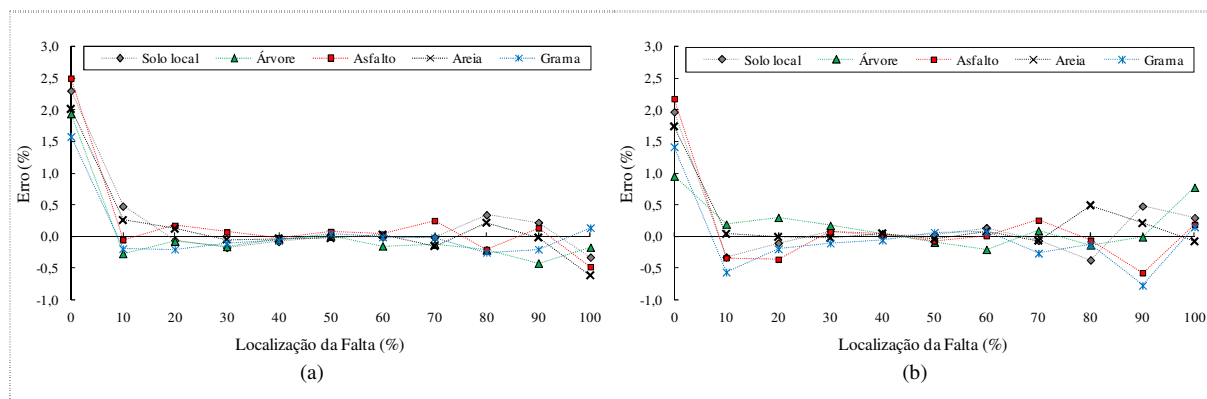


Figura 5.24 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

A partir dos resultados mostrados na Figura 5.24 nota-se que a ABMQ apresenta pouca sensibilidade às variações na superfície de contato no ponto da falta. Sendo que os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas nos extremos da linha de transmissão e não excedem 2,5% para condições de FAI momentâneas simuladas na barra local, sendo irrelevantes para faltas na metade da linha.

### H. Influência da Taxa de Amostragem

Para análise da influência da taxa de amostragem, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VIII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.25.

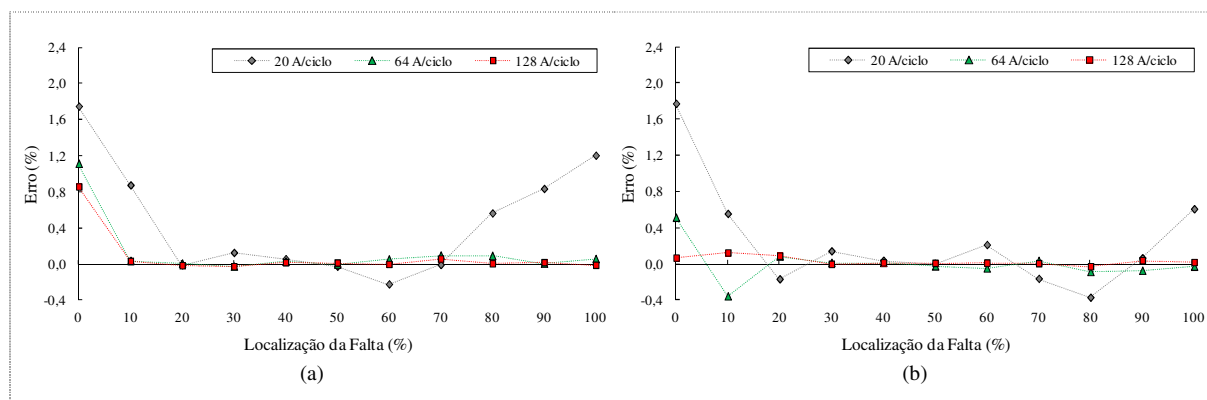


Figura 5.25 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FFFT em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Os resultados exibidos na Figura 5.25 indicam que a ABMQ é pouco sensível às variações na taxa de amostragem dos sinais registrados nas barras local e remota. Em relação aos erros absolutos máximos, estes não excedem 1,8% para FAI nas piores condições simuladas, ou seja, para faltas nas barras local e remota, sendo inclusive próximos a zero para FAI simuladas na metade da linha de transmissão.

### 5.2.2 Análise de Sensibilidade: faltas momentâneas e permanentes em linha paralela

Nesta subseção serão apresentados os resultados dos estudos de casos relativos à análise de sensibilidade da ABMQ a partir de simulações que consideram FAI FT- $a$ , momentâneas e permanentes, aplicadas na linha de transmissão mostrada no diagrama da Figura 5.1, em presença de uma linha de transmissão paralela.

#### A. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: ângulo $\theta$

A análise da influência do ângulo  $\theta$  pode ser realizada mediante os resultados dos erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso I da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.26.

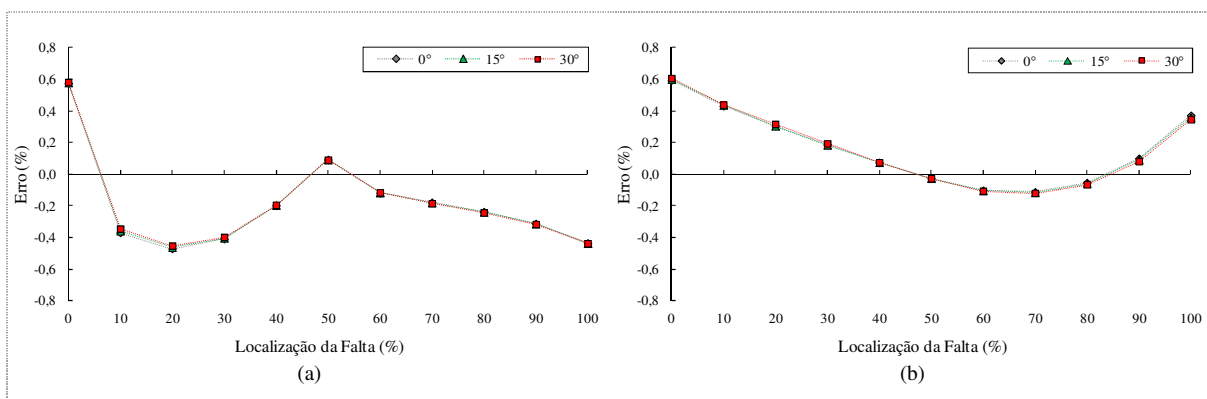


Figura 5.26 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo  $\theta$  - FAI FT- $a$  em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

A sobreposição dos resultados mostrados na Figura 5.26 denota que a ABMQ é insensível às variações dos ângulos de incidências considerados. Observa-se que os erros absolutos máximos são inferiores a 0,6% e decorrem de FAI simuladas na barra local.

#### B. Influência dos Parâmetros do Modelo da FAI: $V_n$ e $V_p$

A Figura 5.27 mostra os erros percentuais em função da distância da falta em que se considera a influência das variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$ , determinados nas simulações para o Caso II da Tabela 5.3.



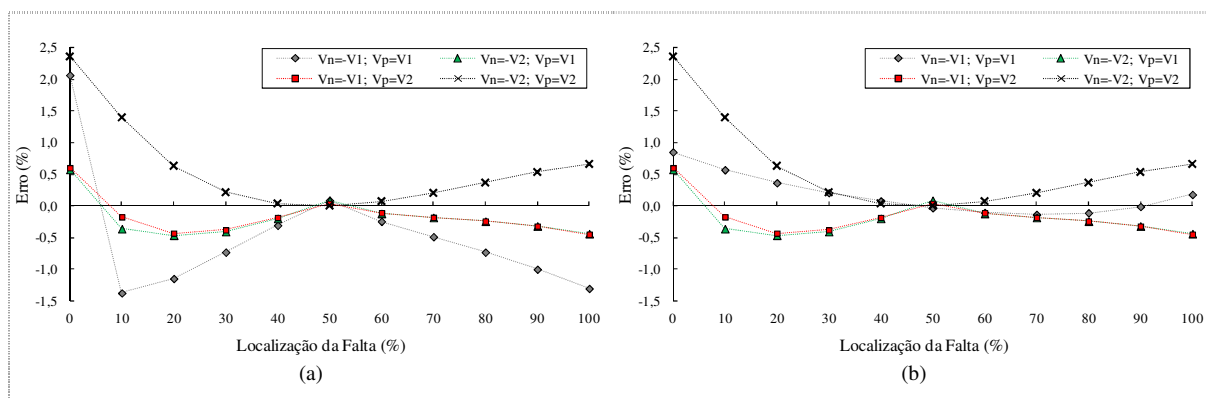


Figura 5.27 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$  - FAI FT- $a$  em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.  
Fonte: O autor (2014).

Observa-se nos resultados mostrados na Figura 5.27 que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações nas tensões  $V_n$  e  $V_p$ . No entanto, os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas nos extremos da linha de transmissão e não excedem 2,5% nas piores condições, sendo aproximadamente zero para FAI simuladas na metade da linha.

### C. Influência das Impedâncias Equivalentes de Thévenin

A influência das impedâncias equivalentes de Thévenin pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.28, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso IV da Tabela 5.3.

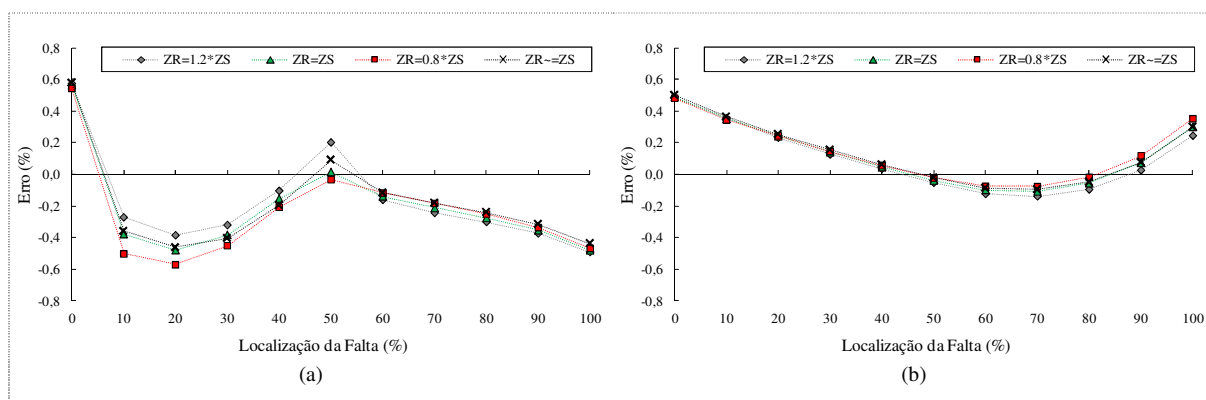


Figura 5.28 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin - FAI FT- $a$  em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.  
Fonte: O autor (2014).

A justaposição das curvas mostradas na Figura 5.28 indica que a ABMQ apresenta pouca sensibilidade às variações nas impedâncias equivalentes de Thévenin. Nota-se que mesmo com modificações de  $\pm 20\%$  nos valores das impedâncias equivalentes, os erros percentuais máximos não excedem 0,6%.

**D. Influência das Impedâncias da Linha de Transmissão**

A Figura 5.29 mostra os erros percentuais em função da distância da falta estabelecidos nas simulações para o Caso III da Tabela 5.3 e considera a influência das impedâncias da linha de transmissão.

Os resultados retratados na Figura 5.29, tanto para FAI momentâneas quanto para FAI permanentes, indicam que a ABMQ apresenta uma notável sensibilidade às variações nesses parâmetros. Observa-se que variações de  $\pm 10\%$  nos valores das impedâncias da linha de transmissão impõem erros absolutos máximos da ordem de 10% na estimativa da distância da falta.

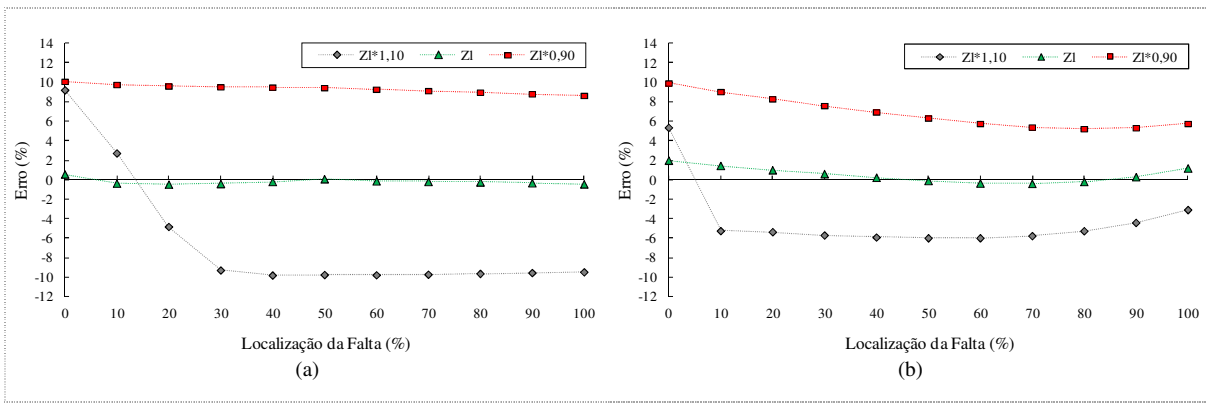


Figura 5.29 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações nas impedâncias da linha de transmissão - FAI FT-a em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

**E. Influência do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão**

Para análise da influência do fluxo de potência ativa na linha de transmissão, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.30.

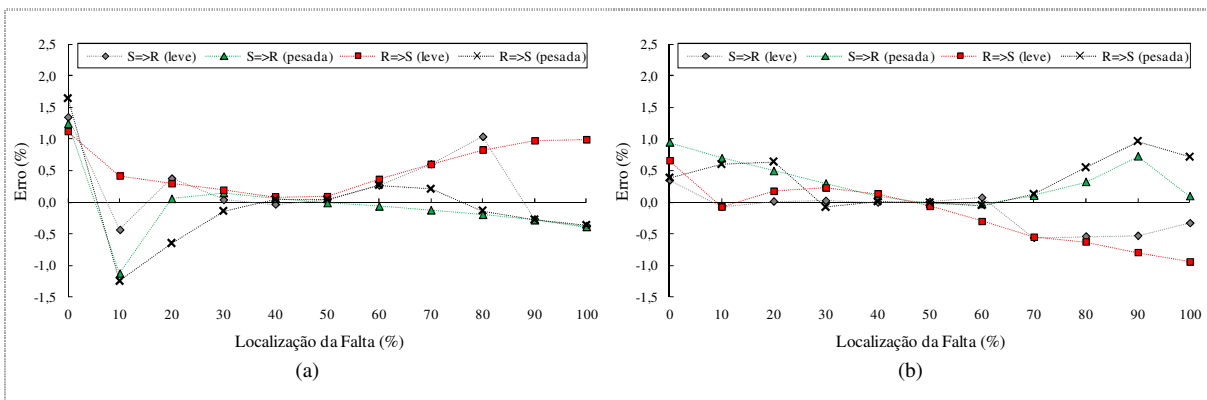


Figura 5.30 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão - FAI FT-a em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Observa-se nos resultados mostrados na Figura 5.30 que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações no fluxo de potência ativa na linha de transmissão. No entanto, os maiores erros percentuais não excedem 1,6% nas piores condições, sendo aproximadamente zero para FAI simuladas na metade da linha.

#### F. Influência do Ângulo de Incidência da Falta

A influência do ângulo de incidência da falta pode ser analisada por meio dos resultados apresentados na Figura 5.31, que considera os erros percentuais em função da distância da falta obtidos nas simulações para o Caso V da Tabela 5.3.

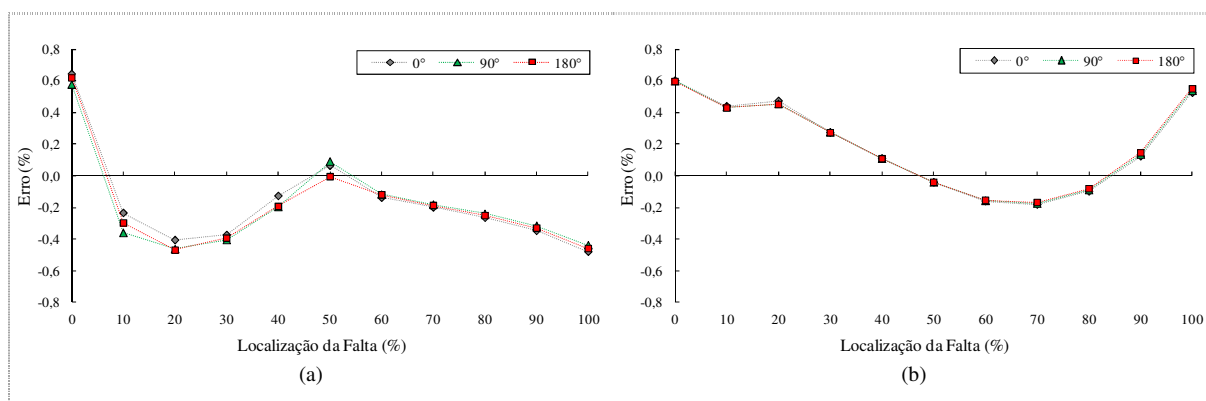


Figura 5.31 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações no ângulo de incidência da falta - FAI FT-a em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

A justaposição e sobreposição dos resultados mostrados na Figura 5.31 para FAI momentâneas e permanentes, respectivamente, demonstra que a ABMQ não é sensível às variações nos ângulos de incidência considerados. Nota-se também que os erros absolutos máximos são da ordem de 0,6% e estão relacionados às FAI simuladas nas extremidades da linha de transmissão.

#### G. Influência da Superfície de Contato no Ponto da Falta

A Figura 5.32 mostra os erros percentuais em função da distância da falta determinados nas simulações para o Caso VI da Tabela 5.3, considerando a influência da superfície de contato no ponto da falta.

Os resultados mostrados na Figura 5.32 indicam que a ABMQ apresenta uma moderada sensibilidade às variações na superfície de contato no ponto da falta. No entanto, os maiores erros percentuais resultam de FAI simuladas na barra local e não excedem 1,7% nos piores cenários, sendo desprezíveis para FAI simuladas na metade da linha.

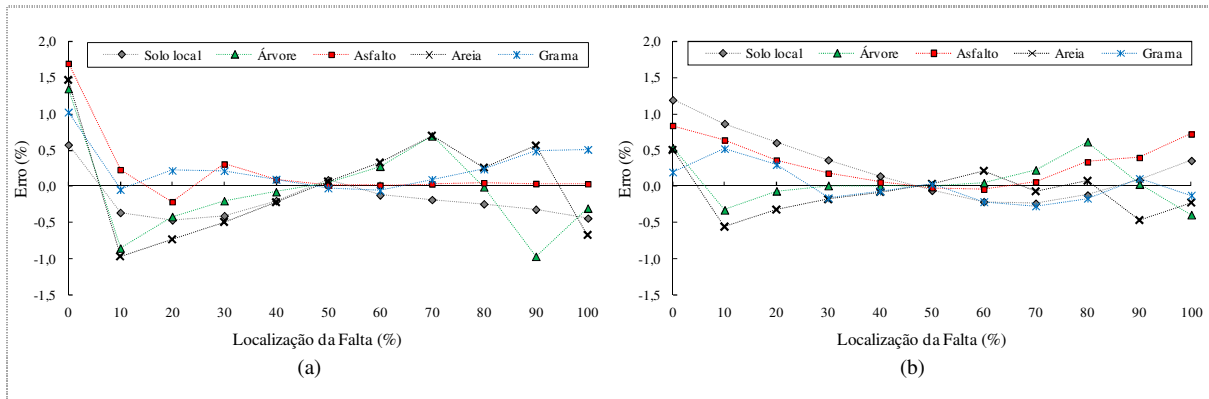


Figura 5.32 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na superfície de contato no ponto da falta - FAI FT-a em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

H. Influência da Taxa de Amostragem

Para análise da influência da taxa de amostragem, considere os erros percentuais em função da distância da falta, obtidos nas simulações para o Caso VIII da Tabela 5.3, apresentados na Figura 5.33.

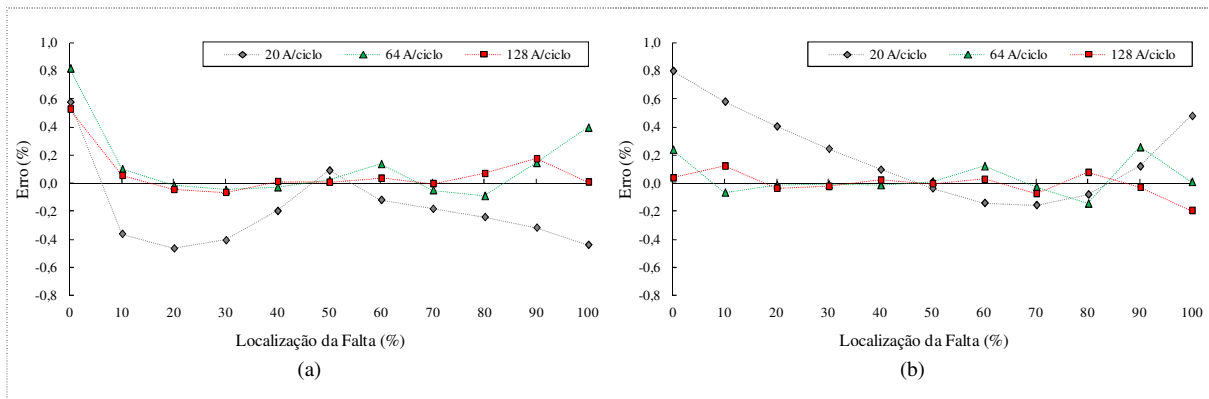


Figura 5.33 - Erro percentual em função da distância da falta considerando variações na taxa de amostragem - FAI FT-a em linha paralela: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Os resultados exibidos na Figura 5.33 mostram que a ABMQ possui uma discreta sensibilidade às variações na taxa de amostragem dos sinais registrados nas barras local e remota. Em relação aos erros absolutos máximos, estes não excedem 0,8% para FAI simuladas na barra local, sendo inclusive próximos a zero para FAI simuladas na metade da linha de transmissão.

### 5.2.3 Análise Comparativa: faltas momentâneas e permanentes em linha simples

Esta subseção apresentará os resultados dos estudos de casos relativos à análise comparativa entre a ABMQ e a ABCS considerando simulações de FAI FT- $a$ , momentâneas e permanentes, aplicadas na linha de transmissão trifásica simples retratada no diagrama da Figura 5.1.

#### A. Análise Comparativa para a Condição I

Para análise comparativa entre a ABMQ e a ABCS, considere os erros percentuais em função da distância da falta apresentados na Figura 5.34, obtidos nas simulações para a Condição I da Tabela 5.4, sendo esta condição uma particularidade do Caso I da Tabela 5.3.

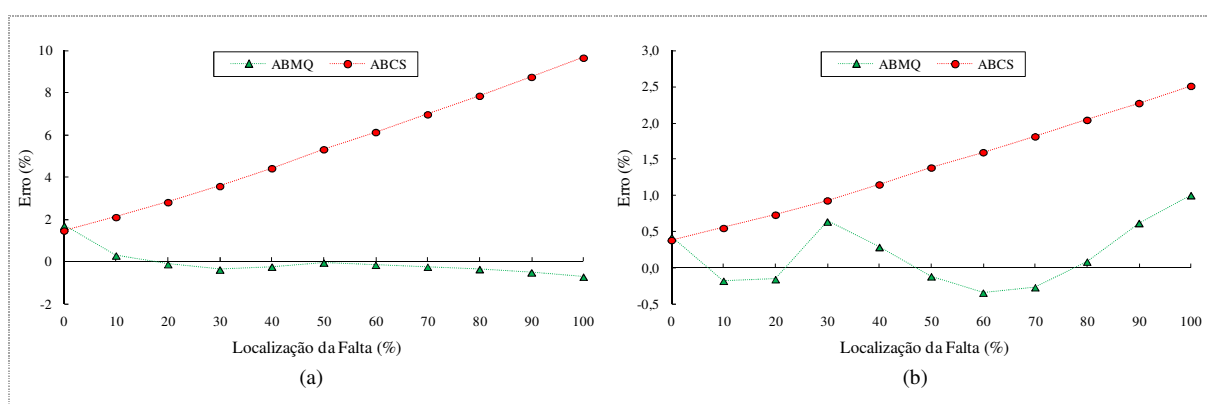


Figura 5.34 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição I - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT- $a$  em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Analisando os resultados para FAI momentâneas, mostrados na Figura 5.34(a), observa-se que para a ABCS os erros percentuais crescem com o aumento da distância da falta, sendo mínimos para faltas na barra local, da ordem de 1,8%, e máximos, aproximadamente 10%, para faltas na barra remota. Já para a ABMQ, os erros percentuais são máximos para faltas na barra local, aproximadamente 2%, e não ultrapassam 0,7% mesmo com o aumento da distância da falta.

Em relação aos resultados para FAI permanentes, apresentados na Figura 5.34(b), para a ABCS os erros percentuais também crescem com o incremento da distância da falta, com valor aproximado de 0,4% para faltas na barra local e de 2,5% para faltas na barra remota. No tocante a ABMQ, os erros percentuais não apresentam um comportamento definido, contudo seus valores não ultrapassam 1% no pior resultado determinado.

Desta forma, verifica-se claramente que, para as condições simuladas, a ABMQ apresenta desempenho superior ao demonstrado pela ABCS, especialmente para a consideração de FAI momentâneas.

### B. Análise Comparativa para a Condição II

A Figura 5.35 apresenta os gráficos dos erros percentuais em função da distância da falta entre a ABMQ e a ABCS, resultantes das simulações para a Condição II da Tabela 5.4. Esta análise permite avaliar o desempenho de ambas as abordagens frente a uma variação nas impedâncias da linha de transmissão.

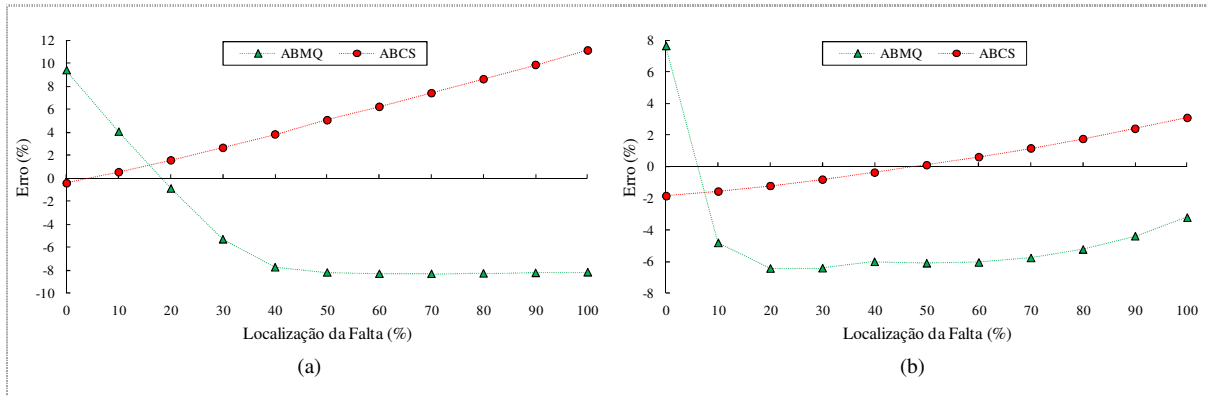


Figura 5.35 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição II - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT-a em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente. Fonte: O autor (2014).

Na análise da Figura 5.35(a), que descreve os resultados para FAI momentâneas, observa-se que para a ABCS os erros percentuais são mínimos, da ordem de -0,5%, para faltas simuladas na barra local e aumentam com a distância da falta, sendo máximos, aproximadamente 10%, para faltas na barra remota. Em relação à ABMQ, os erros percentuais apresentam um comportamento decrescente para faltas no início da linha de transmissão e que tornam a crescer com o aumento da distância da falta, com valores absolutos máximos da ordem de 10%.

No tocante aos resultados para FAI permanentes, mostrados na Figura 5.35(b), observa-se que as curvas dos erros percentuais apresentam comportamentos semelhantes aos apresentados na Figura 5.35(a), porém com outros valores de erros percentuais mínimos e máximos.

Assim, do ponto de vista comparativo, verifica-se que, para as condições simuladas, a ABCS apresenta um melhor desempenho em relação à ABMQ. Todavia, os resultados dos erros percentuais são superiores a 4% na maioria dos pontos de FAI momentâneas simuladas.

### C. Análise Comparativa para a Condição III

A análise comparativa entre a ABMQ e a ABCS para a Condição III da Tabela 5.4 consiste de uma particularidade do Caso VI da Tabela 5.3. Tal análise possibilita avaliar o desempenho de ambas as abordagens frente à ocorrência de uma FAI em que a superfície de contato é o asfalto.

A partir dos resultados para FAI momentâneas, mostrados na Figura 5.36(a), é possível verificar que em relação à ABCS os erros percentuais crescem com o aumento da distância da falta, com valor mínimo da ordem de 1%, para faltas na barra local, e valor máximo de 18%, para faltas na barra remota. Já em relação à ABMQ, os erros percentuais decrescem rapidamente com o aumento da distância da falta e atingem valores pouco significativos na grande maioria das simulações.

Em relação aos resultados para FAI permanentes, apresentados na Figura 5.36(b), para a ABCS os erros percentuais também crescem com o incremento da distância da falta, com valor aproximado de 0,25% para faltas na barra local e de 3,2% para faltas na barra remota. No tocante a ABMQ, os erros percentuais não apresentam um comportamento definido, contudo seus valores não ultrapassam 1,25% no pior resultado obtido.

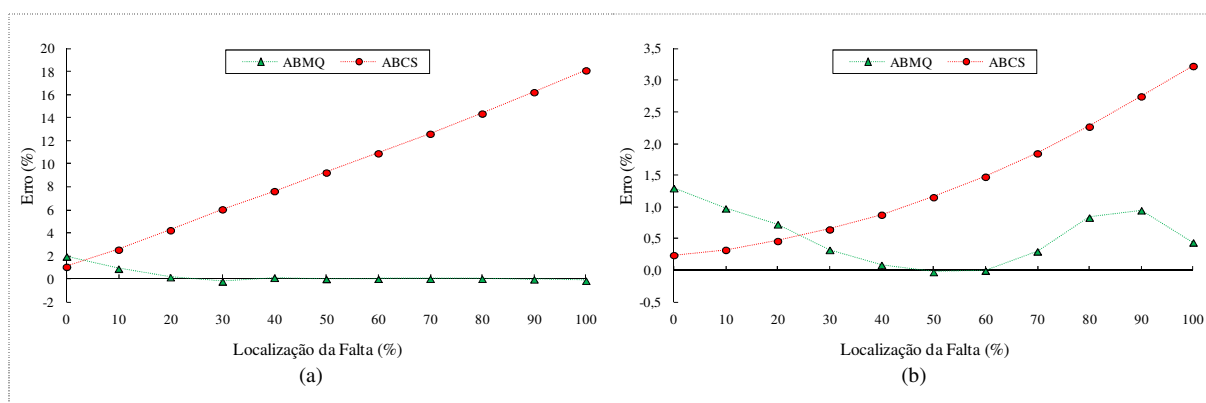


Figura 5.36 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição III - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT- $\alpha$  em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Assim, os resultados mostrados na Figura 5.36 demonstram efetivamente, para as condições simuladas, que a ABMQ apresenta desempenho superior ao demonstrado pela ABCS, particularmente para as condições de FAI momentâneas.

#### D. Análise Comparativa para a Condição IV

A Figura 5.37 apresenta os resultados dos erros percentuais em função da distância da falta para a análise comparativa entre a ABMQ e a ABCS considerando a Condição IV da Tabela 5.4, que é uma particularidade do Caso IV da Tabela 5.3.

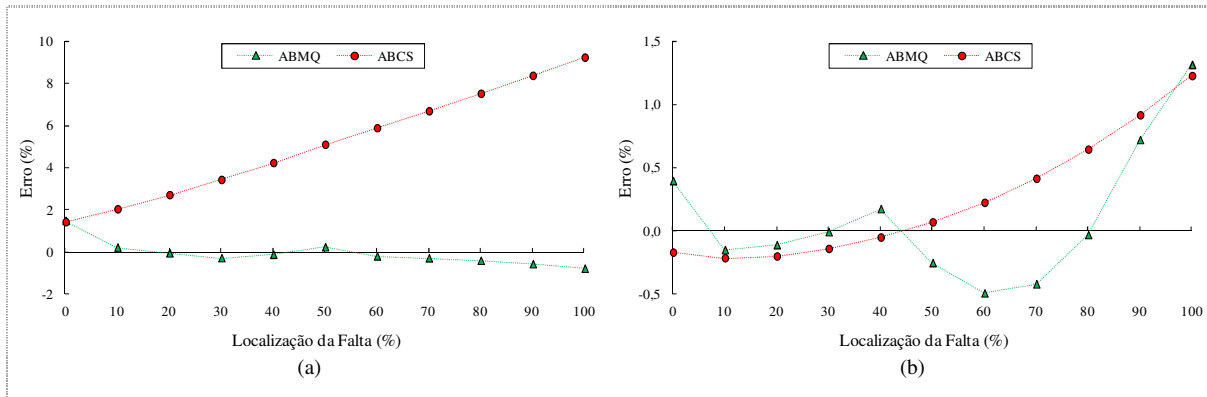


Figura 5.37 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição IV - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT-a em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Segundo os resultados mostrados na Figura 5.37(a), que decorrem das simulações para FAI momentâneas, e de forma semelhante ao observado no comportamento retratado na Figura 5.36(a), verifica-se que para a ABCS os erros percentuais crescem com o aumento da distância da falta, com valor mínimo da ordem de 1,5%, para faltas na barra local, e valor máximo aproximado de 9%, para faltas na barra remota. Já em relação à ABMQ, os erros percentuais decrescem rapidamente com o aumento da distância da falta, com erros inicial e final da ordem de 1,5% e -0,5% respectivamente.

Para FAI permanentes, os resultados apresentados na Figura 5.37(b) mostram que para a ABCS os erros percentuais também crescem com o incremento da distância da falta, com valor aproximado de -0,2% para faltas na barra local e de 1,2% para faltas na barra remota. Em relação à ABMQ, os erros percentuais não apresentam um comportamento definido, porém seus valores não ultrapassam 1,3% no pior resultado obtido.

Desta maneira, os resultados retratados na Figura 5.37 indicam claramente, para as condições simuladas, que a ABMQ apresenta desempenho superior ao demonstrado pela ABCS para as condições de FAI momentâneas. Já para FAI permanentes ambas as abordagens apresentam desempenho semelhante.

#### E. Análise Comparativa para a Condição V

A análise comparativa entre a ABMQ e a ABCS para a Condição V da Tabela 5.4 consiste de uma particularidade do Caso VII da Tabela 5.3. Tal análise permite avaliar o desempenho de ambas as abordagens para uma condição de fluxo de potência ativa com carga pesada.

A partir dos resultados para FAI momentâneas, mostrados na Figura 5.38(a), verifica-se novamente que em relação à ABCS os erros percentuais crescem com o aumento da distância da falta, com valor mínimo da ordem de 0,4%, para faltas na barra local, e valor máximo



de 14%, para faltas na barra remota. Em relação à ABMQ, os valores dos erros são pouco significativos na grande maioria das simulações.

Em relação aos resultados para FAI permanentes, apresentados na Figura 5.38(b), para a ABCS os erros percentuais também crescem com o incremento da distância da falta, com valor aproximado de -0,6% para faltas na barra local e de 2,1% para faltas na barra remota. No tocante a ABMQ, os erros percentuais não apresentam um comportamento definido, contudo seus valores máximos são da ordem de 1,5% no pior resultado obtido.

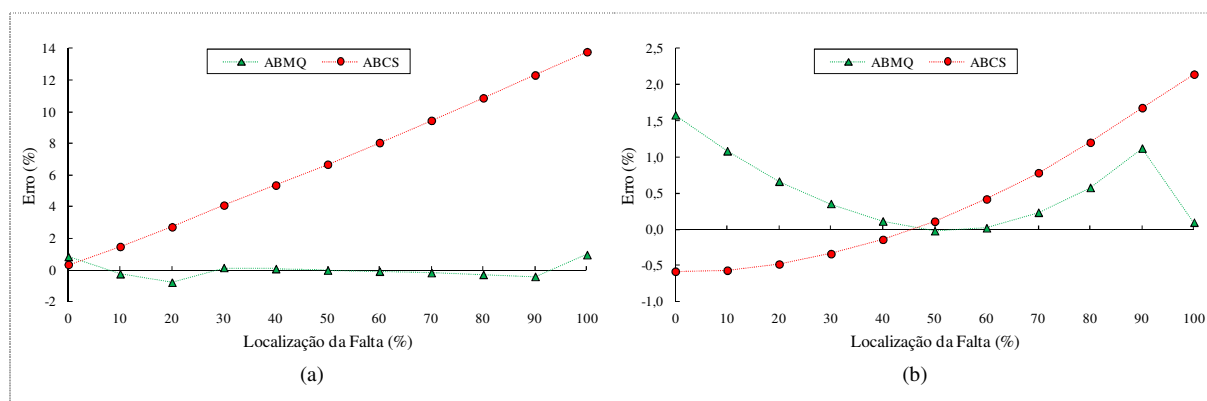


Figura 5.38 - Erro percentual em função da distância da falta considerando a Condição V - comparação entre ABMQ e ABCS - FAI FT-*a* em linha simples: (a) FAI momentânea; (b) FAI permanente.

Fonte: O autor (2014).

Assim, os resultados apresentados na Figura 5.38 mostram que, para as condições simuladas, a ABMQ apresenta desempenho superior ao demonstrado pela ABCS para as condições de FAI momentâneas. Em relação à FAI permanentes, observa-se que a ABCS possui melhor desempenho para faltas na primeira metade da linha de transmissão, com erro máximo igual a 2,14%, e a ABMQ tem resultados superiores para faltas na segunda metade da linha, com erro máximo de 1,57%.

#### 5.2.4 Casos Reais de Falta de Alta Impedância

Para avaliar a resposta da técnica de LDFAI proposta frente a situações reais, serão considerados dois casos de FAI ocorridos na linha de transmissão Camaquã - Guaíba 2 (CAM-GUA2) do Sistema Interligado Nacional (SIN), conforme mostra a Figura 5.39. Esta linha de transmissão possui nível de tensão de 230 kV e comprimento de 89,96 km. As faltas verificadas pelas equipes de manutenção/operação da linha de transmissão foram do tipo FT-*a* (FAI 1) e FT-*c* (FAI 2), localizadas, respectivamente, a 7,0 km e 44 km do terminal local (CAM). O registro de tais faltas, com dados sincronizados de ambos os terminais, foi realizado com uma taxa de amostragem de 20 amostras/ciclo.

A linha de transmissão CAM-GUA2 é não transposta, porém as impedâncias disponibilizadas são em componentes de seqüências, sendo  $Z_0 = 0,3922 + j 1,4515 \text{ } [\Omega/\text{km}]$  e  $Z_1 = Z_2 = 0,1016 + j 0,5044 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ .

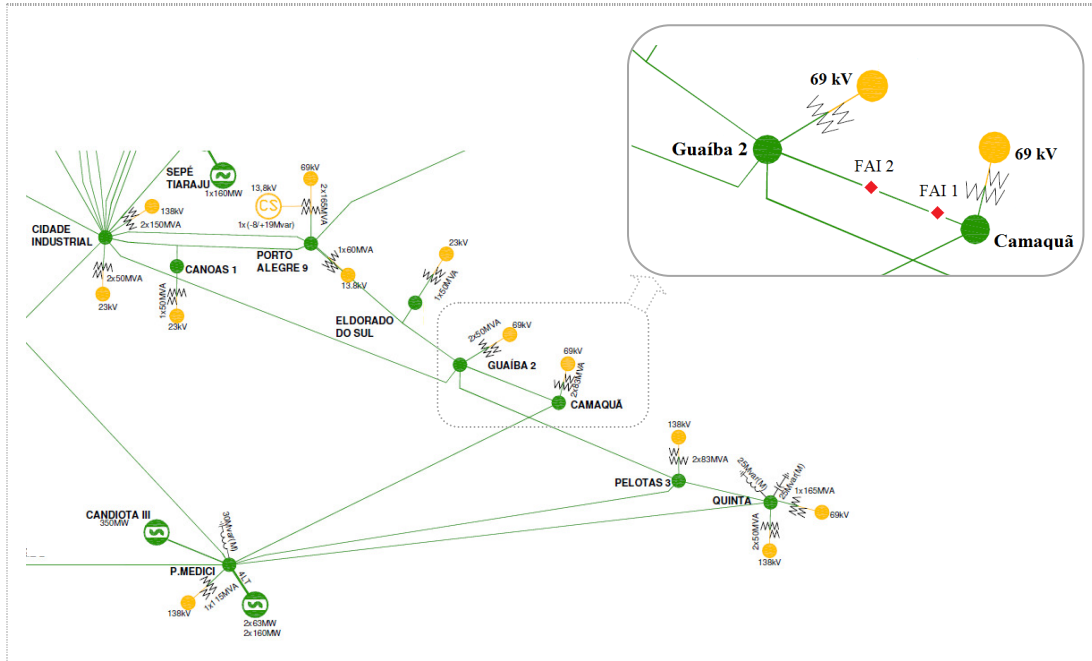


Figura 5.39 - Linha de transmissão CAM-GUA2 - sistema interligado nacional. Fonte: (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2014).

A Figura 5.40 mostra as formas de ondas das correntes relativas à FAI FT-*a* ocorrida na linha de transmissão CAM-GUA2.

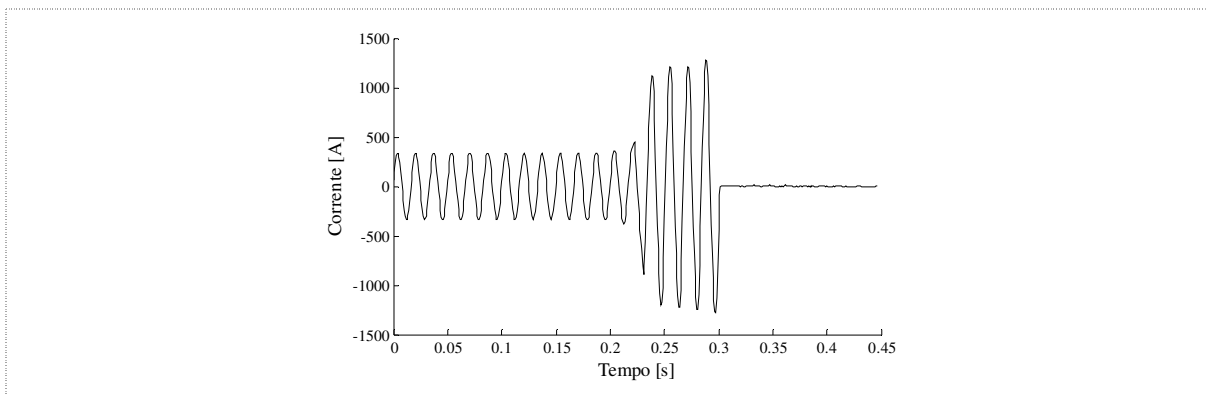


Figura 5.40 - Corrente de falta na fase *a* para a FAI FT-*a* real na linha de transmissão CAM-GUA2. Fonte: O autor (2014).

A Figura 5.41 retrata a forma de onda da corrente na fase *c* da FAI FT-*c* registrada na linha de transmissão CAM-GUA2.

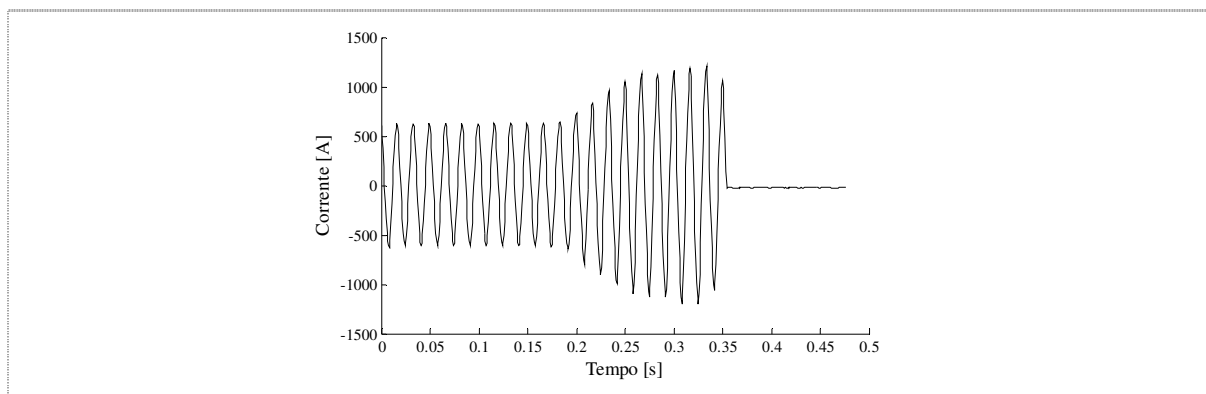


Figura 5.41 - Corrente de falta na fase *c* para a FAI FT-*c* real na linha de transmissão CAM-GUA2.  
Fonte: O autor (2014).

Comparando as formas de ondas exibidas nas Figuras 5.40 e 5.41 com as que retratam as FAI resultantes do contato de condutores energizados com vegetações (árvore e grama), sendo estas obtidas a partir dos polinômios descritos na Tabela 2.2 e mostradas na Figura 2.9, apresentam uma significativa similaridade. Assim sendo, tal semelhança ratifica o modelo de FAI utilizado nos casos simulados, particularmente em relação à proposição de uma resistência de falta que varia com o tempo, conforme Figura 2.7.

A Figura 5.42 apresenta os períodos pré-falta, durante a falta e pós-falta dos sinais trifásicos de tensão e corrente das FAI FT-*a* e FT-*c* ocorridas na linha de transmissão CAM-GUA2. Destacam-se na Figura 5.42 os instantes de detecção (barra em negrito) das FAI e os ciclos (destacados em verde) em que foram calculados os consecutivos fasores para aplicação da ABMQ.

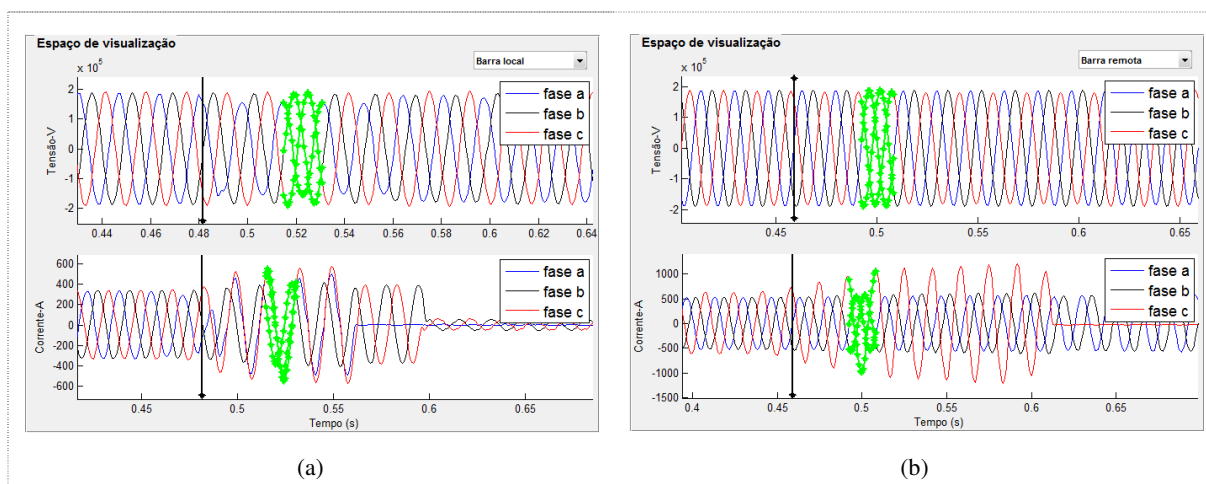


Figura 5.42 - Sinais trifásicos de tensão e corrente das FAI reais ocorridas na linha de transmissão CAM-GUA2: (a) FAI FT-*a*; (b) FAI FT-*c*.  
Fonte: O autor (2014).

A Tabela 5.5 apresenta os resultados das estimativas de LDFAI considerando a ABMQ aplicada às FAI descritas no início dessa subseção. É mostrada também, para um caso, a estimativa de localização obtida com um algoritmo de LDF comercial.

Tabela 5.5 - Resultados das estimativas de localização de faltas de alta impedância reais.

Dados Reais					ABMQ		ABCS		LDF <sub>comercial</sub>	
Falta	Barra Local	$l$ [km]	$x_{\text{real}}$ [km]	Causa	$x_{\text{est}}$ [km]	Erro [%]	$x_{\text{est}}$ [km]	Erro [%]	$x_{\text{est}}$ [km]	Erro [%]
FT- <i>a</i>	CAM	89,96	7,00	vegetação	9,64	2,94	21,38	15,98	NI	NI
FT- <i>c</i>	CAM	89,96	44,00	vegetação	55,07	12,31	25,90	20,12	73,90	33,24

Nota:

NI: Não Informado

Em relação aos resultados apresentados na Tabela 5.5, o erro determinado na estimativa do local da falta foi de 2,94% para a FAI FT-*a*, aplicando-se a ABMQ, e de 15,98%, para a ABCS. Nota-se que esse erro é pouco superior aos valores obtidos nos casos simulados, que na sua maioria foram inferiores a 2,5%. Contudo, dada à quantidade de variáveis envolvidas em um evento real, descritas na subseção 5.1.1.3, a amplitude deste erro é de fato aceitável.

Para a FAI FT-*c*, o erro calculado foi de 12,31%, utilizando-se a ABMQ, de 20,12%, para a ABCS, e de 33,24%, considerando-se um algoritmo de LDF comercial, sendo que, para os três casos, os erros são de amplitudes não desprezíveis e diferem bastante do valor calculado para a FAI FFT-*ac*. Conforme descrito no Capítulo 4, seção 4.5, a detecção do instante de ocorrência de uma falta é uma etapa que precede a aplicação dos algoritmos de LDF, contudo tal procedimento não é trivial, principalmente em se tratando de FAI, e pode influenciar significativamente na estimativa do local da falta (SILVEIRA, 2007). Observa-se na Figura 5.42(b) que a amplitude da corrente na fase *c* é maior do que nas outras fases mesmo em instantes que antecedem à detecção da FAI, o que sugere o início da falta em um momento anterior ao que fora determinado. Mesmo assim, a ABMQ apresentou um resultado expressivamente melhor do que os obtidos pelo algoritmo de LDF comercial e pela ABCS.

### 5.3 ANÁLISE GERAL

Os oito casos para análise de sensibilidade apresentados nas subseções 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.1.3 e 5.2.2, que consideram FAI momentâneas e permanentes em linha de transmissão simples e paralela, descrevem também, para cada caso, a influência da distância da falta na estimativa de LDF utilizando a ABMQ. Analisando os resultados mostrados nas Figuras 5.3 a 5.26 (excetuando-se as Figuras 5.5, 5.13 e 5.21), verifica-se que os erros percentuais em função da distância da falta possuem comportamentos semelhantes, ou seja, seus valores são decrescentes na primeira metade da linha, praticamente nulos na metade e crescentes na segunda metade. Tais comportamentos podem indicar que a ABMQ apresenta alguma sensibilidade em relação à distância da falta, contudo os maiores erros percentuais absolutos não ultrapassam 2,5% nos piores cenários simulados.

Outro aspecto importante a ser observado é que, verdadeiramente, os erros obtidos nas estimativas das distâncias das faltas retratados nas Figuras 5.5, 5.13 e 5.21, considerando-se a ABMQ, podem ser considerados elevados. Entretanto, tais erros, quando comparados com os valores apresentados na Tabela 5.5 para FAI reais, apresentam magnitudes inferiores às obtidas quando da aplicação da ABCS e do estimador comercial. Além disso, é possível empregar técnicas de estimação de parâmetros para melhorar a precisão no cálculo dos valores das impedâncias das linhas de transmissão, reduzindo, desta forma, os erros nas estimativas das distâncias das faltas.

A consideração de casos reais de FAI, mesmo que para um número reduzido, permite destacar três aspectos importantes. Primeiro, que as FAI monofásicas à terra são as ocorrências mais comuns. Segundo, que as formas de ondas teóricas, que retratam as FAI resultantes do contato de condutores energizados com vegetações (árvore e grama), apresentam uma significativa similaridade com a forma de onda de uma FAI real. Terceiro, mesmo para um algoritmo de LDF comercial, em que os custos de pesquisa, implementação e compromisso com seus respectivos clientes é de elevada exigência, o erro percentual na estimativa da falta são ainda consideráveis.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo apresentou os resultados obtidos nos estudos de casos, cujo objetivo principal foi a avaliação de desempenho da técnica de LDFAI proposta nesta tese. Para isso, os estudos de casos foram divididos em três grupos: análise de sensibilidade, análise comparativa e casos reais, sendo os dois primeiros realizados por meio de simulações no programa ATP e aplicados no algoritmo de LDFAI implementado no programa computacional Matlab.

Na análise de sensibilidade, verificou-se que, para FAI monofásicas, bifásicas e trifásicas à terra, em linhas de transmissão simples ou paralela, a ABMQ apresenta resultados satisfatórios frente às variações dos parâmetros avaliados e que os erros percentuais absolutos máximos não excedem 2,5%, exceto para variações elevadas nas impedâncias da linha de transmissão. Na análise comparativa, observou-se, nos casos propostos, que a ABMQ possui melhor desempenho em relação à ABCS, particularmente nos casos que consideram FAI momentâneas. Já para casos reais de FAI, a ABMQ apresenta desempenho superior quando comparada com a ABCS e com o estimador de LDF comercial. Sendo que para um dos casos reais de FAI, o erro percentual calculado foi ligeiramente superior aos valores obtidos nos testes para análise de sensibilidade e comparação.

O Capítulo seguinte apresentará as conclusões e comentários finais sobre o trabalho desenvolvido nesta tese, bem como suas contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

## 6 CONCLUSÕES

Os sistemas de transmissão de energia elétrica de grande porte, como é o sistema brasileiro, caracterizam-se por sua estrutura ramificada e interligada, o que permite reconfigurações nas linhas de transmissão para manter a capacidade de transmissão de energia em decorrência da abertura de uma linha sob condição de falta. Mesmo assim, a confiabilidade do sistema diminui em decorrência da redução do número de linhas de transmissão em operação. Outro fator importante são as perdas monetárias em decorrência da interrupção da energia por causa de faltas permanentes não localizadas. Nesse contexto, a rápida e precisa determinação do local da falta possibilita que equipes de manutenção procedam ao restabelecimento da linha de transmissão afetada em menor tempo. Fica clara, então, a importância da aplicação dos métodos de localização de faltas para a melhoria da qualidade de transmissão de um SEP, bem como da qualidade da energia elétrica fornecida. Desta forma, este trabalho consistiu em um estudo teórico que aborda o problema da localização de faltas de alta impedância em linhas de transmissão curtas.

Inicialmente foi apresentada uma revisão sobre as características das FAI e dos principais métodos de LDF, bem como, sobre o estado da arte das técnicas de LDFAI. Destaca-se no Capítulo 2, a consideração de diferentes tipos de superfícies de contato no ponto da falta e a proposição de intercâmbio entre os resistores  $R_F$  e  $R_F(t)$  no modelo de FAI proposto na literatura para permitir a representação dos fenômenos de *buildup* e *shoulder* na corrente de falta, sendo essa proposição uma particular contribuição deste trabalho. Dado que a grande maioria das técnicas de LDF fundamentadas na impedância, apresentada na literatura técnica, restringe-se a faltas puramente resistivas, com resistência constante, em que essas são casos particulares de FAI, a revisão da literatura, desenvolvida no Capítulo 3, mostrou que existem poucos trabalhos que abordam o problema da LDFAI, particularmente os que consideram suas formulações no domínio da frequência e em componentes de fase. Desta forma, como um texto de revisão, os Capítulos 2 e 3 desta tese contribuem para auxiliar outros pesquisadores no estudo de FAI e na sua localização.

A seguir, no Capítulo 4, foi apresentada a técnica proposta para LDFAI em linhas de transmissão fundamentada na impedância aparente e no MMQ, desenvolvida no domínio da frequência e que utiliza componentes de fase. A abordagem proposta foi baseada em uma equação que estima a distância da falta em função dos parâmetros da linha de transmissão e dos fasores de tensão e corrente obtidos em ambos os terminais da linha e em um sistema sobredeterminado de equações lineares, cuja solução é determinada por meio da aplicação do

MMQ. Tal sistema foi obtido considerando-se o cálculo de consecutivos fasores de tensão e corrente durante o período de duração da FAI. Desta forma, a principal contribuição desta tese foi o desenvolvimento de uma técnica de LDFAI que considera linhas de transmissão simples e paralelas, transpostas ou não, que leva em conta as principais características de uma FAI, que pode ser aplicada na localização de faltas momentâneas e permanentes, que possui relativa simplicidade de implementação e que apresenta aplicabilidade a casos reais.

Finalmente, os resultados obtidos indicam claramente que ABMQ possui validade como técnica de LDFAI em linhas de transmissão em decorrência do desempenho demonstrado e, também, por características tais como: formulação simplificada no domínio da frequência, simplicidade e facilidade de implementação em dispositivos reais e aplicabilidade a casos reais de FAI. Com base no que fora apresentado nesta tese e nos resultados obtidos nos estudos de casos é possível fazer as seguintes considerações finais:

- o modelo de FAI apresentado, que considera um resistor  $R_F$  com resistência que varia com o tempo no modelo de FAI proposto na literatura, permite a reprodução das características típicas deste tipo de falta, conforme mostram as Figuras 2.8, 5.40 e 5.41;
- mantidas as características nas formas de onda de FAI descritas na literatura, mas diferentemente do que é descrito para FAI em sistemas de distribuição, nos sistemas de transmissão a amplitude da corrente de FAI pode ser da ordem de 2 pu a 5 pu, conforme pode ser observado nas Figuras 5.40, 5.41 e 5.42;
- exceto para variações elevadas nas impedâncias da linha de transmissão, o desempenho da técnica de LDFAI proposta é bastante satisfatório considerando-se às variações dos parâmetros avaliados, particularmente quando comparado com o desempenho da ABCS;
- a técnica de LDFAI aqui apresentada possui sensibilidade a erros nas impedâncias que modelam as linhas de transmissão, contudo os erros percentuais obtidos nos casos simulados não invalidam a aplicabilidade dessa abordagem, especialmente se aplicada uma técnica que reduza o erro nas estimativas dessas impedâncias;
- conforme mostrado nos estudos de casos para FAI reais, embora limitado a dois casos, devido a escassa disponibilidade de dados para este tipo de evento, a ABMQ apresenta promissora aplicabilidade a situações reais de FAI em linhas de transmissão.

Nos estudos de casos, a técnica de localização proposta foi avaliada considerando-se mudanças nas variáveis que direta ou indiretamente compõem as equações de LDFAI formuladas. No julgamento do autor, muito embora a técnica de LDFAI proposta apresente



uma considerável sensibilidade com relação aos parâmetros da linha de transmissão, conforme ficou evidente nos estudos de casos, a abordagem mostrou-se bastante promissora na LDFAI em linhas de transmissão curtas, pois a estimativa de tais parâmetros pode ser melhorada a partir da aplicação de uma técnica de estimação de parâmetros. Além disso, aplicabilidade da técnica a linhas não transpostas e a consideração de uma resistência de falta que varia com o tempo no modelo de FAI proposto na literatura ratificam as contribuições dadas no desenvolvimento desta tese.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Embora o trabalho desenvolvido nesta tese traga importantes contribuições para a solução do problema de LDFAI em linhas de transmissão, cujos estudos de casos abrangeram uma análise de sensibilidade, uma análise comparativa com a técnica de LDFAI que compreende o estado da arte e aplicação em casos reais, este trabalho ainda pode ser melhorado e aperfeiçoado a partir das seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- considerar na formulação de LDF um modelo de linha de transmissão que leve em conta o efeito capacitivo;
- considerar os erros de medições dos sinais de tensão e corrente, decorrentes do uso de transformadores de corrente e potencial;
- considerar uma solução para o sistema sobredeterminado de equações lineares utilizando o método de mínimos quadrados ponderados, de tal forma que possa ser atribuído diferentes pesos às "medições", que são as múltiplas estimativas dos fasores de tensão e corrente;
- considerar a utilização de uma técnica de estimação de parâmetros para determinar mais precisamente as impedâncias da linha de transmissão, haja vista que o método de LDF fundamentado na impedância é relativamente sensível a tais parâmetros.



## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- AHSAEE, M. G. Accurate NHIF locator utilizing two-end unsynchronized measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.28, n.1, p.419-426, 2013.
- ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems**. Ames: Iowa State University, 1973.
- ANDRADE, L.; PONCE de LEÃO, T. Impedance-based fault location analysis for transmission lines. In: IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2012, Orlando, FL. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012. p.1-6.
- BERMAN, A.; XU, W. Analysis of faulted power systems by phase coordinates. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.13, n.2, p.587-595, 1998.
- BO, Z. Q. *et al.* Transient based protection for power transmission systems. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, Singapore. **Proceedings...** New York: IEEE, 2000. p.1832-1837.
- BOLLEN, M. H.; STYVAKTAKIS, E.; GU, I. Y. Categorization and analysis of power system transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.20, n.3, p.2298-2306, 2005.
- BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative Transients Program: ATP-EMTP**. Portland, OR, 2007.
- DALCASTAGNÊ, A. L. **Método iterativo para localização de faltas em linhas de transmissão a partir de fasores não-sincronizados**. 2007. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- DALCASTAGNÊ, A. L. *et al.* An iterative two-terminal fault-location method based on unsynchronized phasors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.23, n.4, p.2318-2329, 2008.
- DJURIC, M. B.; RADOJEVIC, 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.60-67, 1999.
- DUGAN, R.C; McGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power system quality**. New York: McGraw – Hill, 1996.

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, p.676-686, Apr. 1990.

FERRAZ, R. G. *et al.* Park's transformation analytical approach of transient signal analysis for power systems. In: IEEE NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM, 2012, Champaign. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012. p.1-6.

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

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, 2010.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **High impedance fault detection technology**, WGD15 Report, 1996. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>. Acesso em: 22 dez. 2012.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **Considerations for use of disturbance recorders**. WG Report, 2006. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>. Acesso em: 22 dez. 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **Std. 1243-1997**: IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines. New York, 1997.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **Std. C37.114-2009**: IEEE Guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines. New York, 2009. Revision of IEEE Std. C37.114-2004.

JAMALI, S.; GHAFFARZADEH, N. A new method for arcing fault location using discrete wavelet transform and wavelet network. **European Transactions on Electrical Power**, New Jersey, v.22, p.601-615, 2012.

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

KANG, S-H. *et al.* A fault location algorithm based on circuit analysis for untransposed parallel transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.24, n.4, p.1850-1856, 2009.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. Boca Ratón: CRC , 2002.

KUROKAWA, S. *et al.* Decomposição modal de linhas de transmissão a partir do uso de duas matrizes de transformação. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.18, n.3, p.372-380, 2007.

KRON, G. Tensorial analysis of integrated transmission systems. Part I: the six basic reference frames. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v.70, p.1239-1248, 1952.

LEE, C. J. *et al.* A new two-terminal numerical algorithm for fault location, distance protection, and arcing fault recognition. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v.21, n.3, p.1460-1462, 2006.

LIN, S. *et al.* Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines. **IET Generation, Transmission & Distribution**, London, v.6, n.8, p.764-772, 2012.

LIU, C-W. *et al.* A fault location technique for two-terminal multisection compound transmission lines using synchronized phasor measurements. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v.3, n.1, p.113-121, 2012.

LOPES, F. V.; FERNANDES JR, D.; NEVES, W. L. A. A traveling wave detection method based on Parks transformation for fault locators. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.28, n.3, p.1626-1634, 2013.

MAGNANO, F. H.; ABUR, A. Fault location using wavelets. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.13, n.4, p.1475-1480, Oct. 1998.

MATLAB. **The Language of Technical Computing**. [S.l.]: The Mathworks, 2010.

MORETO, M.; ROLIM, J. G. Análise Automática de Oscilografias em Sistemas Elétricos de Potência. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.21, n.4, p.347-362, 2010.

NAM, S. R. *et al.* A modeling method of high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, Vancouver. **Proceedings...** New York: IEEE, 2001. p.1175-1180.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapas do sistema interligado nacional**. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/mapas\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx)>. Acesso em: 18 jun. 2014.

PEREZ, J. A guide to digital fault recording event analysis. In: ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS, 63., 2010, College Station. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p.1-17.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer relaying for power systems**. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **High impedance fault detection technology**. Report of PSRC Working Group D15, 1996. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org/>>. Acesso em: 18 maio 2013.

RADOJEVIC, Z. M.; TERZIJA, DJURIC, M. B. Numerical algorithm for overhead lines arcing faults detection and distance and directional protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.15, n.1, p.31-37, 2000.

RADOJEVIC, Z. M.; SHIN, J-R. New one terminal digital algorithm for adaptive reclosing and fault distance calculation on transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.21, n.3, p.1231-1237, 2006.

RADOJEVIC, Z. M. A new spectral domain approach to the distance protection, fault location and arcing faults recognition on transmission lines. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Lausanne, v.29, p.183-190, 2007.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault location on power networks**. London: Springer, 2010.

SANTOS, W. C. *et al.* High impedance faults: from field tests to modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, New York, v.24, p.885-896, 2013.

SILVA, K. M. *et al.* Detecção e classificação de faltas a partir da análise de registros oscilográficos via redes neurais artificiais e transformada wavelet. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.18, n.2, p.163-172, 2007.

SILVA, M.; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V. A fault locator for transmission lines using traveling waves and wavelet transform theory. In: IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 8., 2004, Amsterdam. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004. p.212-215.

SILVEIRA, E. G. **Localização de faltas em linhas de transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas**. 2007. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

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**, New York, v.76, p.518-530, 1957.

SWIFT, G. W. 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 1 – Fourier transformation method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v.PAS-100, n.3, p.1316-1323, 1981.

TAKAGI, T. *et al.* A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part 2 – Laplace transform method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v.PAS-101, n.3, p.564-573, 1982a.

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.PAS-101, n.8, p.2892-2898, 1982b.

ZANETTA JR, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.





## ANEXO A: ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS

Com o objetivo de desenvolver uma solução matemática e intuitiva da expressão (4.9), reescrita a seguir:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A} x + \mathbf{e}, \quad (\text{A.1})$$

onde  $\mathbf{e}$  é o vetor dos erros cometidos ao se tentar explicar o valor observado  $\mathbf{b}$  a partir do vetor de regressores  $\mathbf{A}$  e de  $x$ , será assumido que o valor estimado  $x$  é conhecido, ou seja:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A} \hat{x} + \mathbf{e} \quad (\text{A.2})$$

Conforme (AGUIRRE, 2007), a fim de encontrar uma solução que tenha algum significado deve-se responder à seguinte pergunta: Dada uma solução  $\hat{x}$ , além de satisfazer a expressão (A.2), que outra propriedade é desejável? Particularmente, para a solução do problema de LDF, tratada nessa tese, seria interessante que  $\hat{x}$  fosse tal que reduzisse  $\mathbf{e}$ , de alguma forma. De acordo com (AGUIRRE, 2007), para tornar a resposta mais precisa, define-se o somatório do quadrado dos erros conforme:

$$J_{\text{MQ}} = \sum_{i=1}^N e(i)^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = \|\mathbf{e}\|^2, \quad (\text{A.3})$$

que nada mais é do que um índice que quantifica a qualidade de ajuste de  $\mathbf{A}\hat{x}$  ao vetor de dados  $\mathbf{b}$ . Portanto, seria interessante que o valor estimado  $\hat{x}$  minimizasse  $J_{\text{MQ}}$ .

A expressão (A.2) pode ser reescrita segundo:

$$\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{A} \hat{x}. \quad (\text{A.4})$$

Pré-multiplicando ambos os lados da expressão (A.4) pelo vetor transposto de erros ( $\mathbf{e}^T$ ) resulta que:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{b} - \mathbf{A} \hat{x})^T (\mathbf{b} - \mathbf{A} \hat{x}), \quad (\text{A.5})$$

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

$$J_{\text{MQ}} = (\mathbf{b} - \mathbf{A} \hat{x})^T (\mathbf{b} - \mathbf{A} \hat{x}) = \mathbf{b}^T \mathbf{b} - \mathbf{b}^T \mathbf{A} \hat{x} - \hat{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{b} + \hat{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \hat{x}. \quad (\text{A.6})$$

A fim de minimizar a função de custo  $J_{\text{MQ}}$  com respeito à  $\hat{x}$ , é necessário resolver  $(\partial J_{\text{MQ}} / \partial \hat{x}) = 0$ . Fazendo-se isso, tem-se:

$$\frac{\partial J_{\text{MQ}}}{\partial \hat{x}} = -(\mathbf{b}^T \mathbf{A})^T - \mathbf{A}^T \mathbf{b} + (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{A}) \hat{x} = -\mathbf{A}^T \mathbf{b} - \mathbf{A}^T \mathbf{b} + 2\mathbf{A}^T \mathbf{A} \hat{x}. \quad (\text{A.7})$$

Igualando a expressão (A.7) à zero, resulta que:

$$\hat{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (\text{A.8})$$

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  $\hat{x}$  seja mínimo, é necessário que:

$$\frac{\partial^2 J_{MQ}}{\partial \hat{x}^2} = 2 \mathbf{A}^T \mathbf{A} > 0. \quad (\text{A.9})$$

Segundo (AGUIRRE, 2007), a expressão (A.9) é, de fato, verdadeira, pois  $2 \mathbf{A}^T \mathbf{A}$  é positiva definida por construção. Portanto, a expressão (A.8) é o estimador que fornece o valor de  $\hat{x}$  que minimiza o somatório do quadrado dos erros. Desta forma, para a solução de LDF proposta nessa tese, a expressão (A.8) será reescrita conforme:

$$\hat{x} = \left( |\mathbf{A}|^T |\mathbf{A}| \right)^{-1} |\mathbf{A}|^T |\mathbf{b}|. \quad (\text{A.10})$$