

ANDRÉ LUÍS DALCASTAGNÊ

**MÉTODO ITERATIVO PARA LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR
DE FASORES NÃO-SINCRONIZADOS**

**FLORIANÓPOLIS
2007**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MÉTODO ITERATIVO PARA LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR DE
FASORES NÃO-SINCRONIZADOS**

Tese submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

André Luís Dalcastagnê

Florianópolis, Outubro de 2007.

MÉTODO ITERATIVO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR DE FASORES NÃO-SINCRONIZADOS

André Luís Dalcastagnê

‘Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Comunicações e Processamento de Sinais*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.
Orientador

Profª. Kátia Campos de Almeida, Ph.D.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.
Presidente

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

Prof. Rui Seara, Dr.

Prof. Denis Vinicius Coury, Ph.D.

Prof. Jacques Szczupak, Ph.D.

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.

Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valério e Carmem, e à minha irmã, Susana, por todo o apoio e carinho dispensados nesses anos de estudo.

À Rejane, meu grande estímulo na fase final deste doutorado.

Ao Prof. Sidnei Noceti Filho, meu amigo e orientador deste trabalho.

Ao Prof. Hans Helmut Zürn, pela co-orientação deste trabalho e pela didática e paciência para sanar as minhas dúvidas em sistemas de potência.

Ao Prof. Rui Seara, pela co-orientação deste trabalho e pela sua grande ajuda na redação dos trabalhos acadêmicos desenvolvidos ao longo desta pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas correções e sugestões.

Ao Prof. Paulo Márcio da Silveira, pelas sugestões e correções apresentadas no exame de qualificação deste doutorado.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A Mário Wilson Cusatis, Phabio Junckes Setubal, Richard Demo Souza, Taylor Thomson Wisbeck e William Prodanov, grandes amigos que conheci na engenharia.

A Roberto de Souza Salgado e Vilásia Dalcastagné Salgado, por todo o incentivo e apoio aos estudos desde o meu ensino médio.

Ao LINSE, por proporcionar plenas condições para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Sérgio Luiz Zimath, da Reason Tecnologia S.A., por disponibilizar os dados de faltas reais utilizados neste trabalho.

A Ricardo Lira, pela obtenção dos fasores de frequência fundamental das condições de falta reais utilizadas neste trabalho.

A Fernando Santana Pacheco, pela amizade e ajuda na utilização do Latex.

A Elton Luiz Fontão, sempre prestativo e eficiente nas questões relativas à pós-graduação.

Aos amigos do LINSE, pelos onze anos de ótimo convívio.

A todos os meus amigos e familiares, que, de alguma forma, ajudaram-me na realização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

MÉTODO ITERATIVO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR DE FASORES NÃO-SINCRONIZADOS

André Luís Dalcastagnê

Outubro/2007

Orientador: Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.

Co-Orientadores: Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D. e Prof. Rui Seara, Dr.

Área de Concentração: Comunicações e Processamento de Sinais.

Palavras-Chave: localização de faltas; linhas de transmissão; métodos iterativos.

Número de Páginas: 185

RESUMO: Este trabalho propõe um novo método de localização de faltas em linhas de transmissão que utiliza como variáveis de entrada os fasores de frequência fundamental extraídos das medidas de tensão e corrente de ambos os terminais de uma linha de transmissão faltosa obtidas de forma não-sincronizada. O algoritmo proposto é iterativo e emprega um modelo a parâmetros distribuídos para a linha de transmissão. A cada iteração, as magnitudes das tensões calculadas ao longo da linha a partir dos fasores de ambos os terminais são aproximadas por duas retas, cujo ponto de interseção é tomado como a estimativa da localização da falta. O processo é interrompido quando a diferença entre duas estimativas sucessivas atinge um limite mínimo estipulado pelo usuário. Por se basear apenas na magnitude da tensão no ponto de falta, a técnica proposta não requer sincronismo entre as medidas de tensão e corrente tomadas nos dois terminais da linha de transmissão. Por outro lado, tal fato torna possível a existência de duas possíveis soluções para a estimativa de localização de falta. Apesar disso, apenas condições de falta trifásica não-sólida podem causar um erro de convergência. Para evitar tal problema, uma técnica auxiliar é desenvolvida. Os resultados obtidos a partir de diversas condições de falta simuladas através do programa de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP mostram que o método proposto apresenta um erro de localização de falta desprezável se os fasores e os parâmetros da linha de transmissão forem isentos de erros. Para condições de falta reais, a magnitude do erro de localização de falta é dependente apenas da qualidade dos fasores e dos parâmetros da linha de transmissão.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

AN ITERATIVE APPROACH FOR TRANSMISSION LINE FAULT LOCATION BASED ON UNSYNCHRONIZED PHASORS

André Luís Dalcastagnê

October/2007

Advisor: Prof. Sidnei Noceti Filho, D.Sc.

Co-Advisors: Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D. and Prof. Rui Seara, Dr.

Area of Concentration: Comunicações e Processamento de Sinais.

Keywords: fault location; transmission lines; iterative methods.

Number of Pages: 185

ABSTRACT: This research work proposes a new two-terminal fault location method which works with unsynchronized phasors. The proposed approach is iterative and takes into account a distributed line model. At each iteration, the voltage magnitudes calculated from the data of the sending and remote ends are approximated by two straight lines, and the fault location estimate is then defined as the intersection point of these two lines. The process ends when the difference between two successive fault location estimates reaches a threshold stipulated by the user. Since the search process is based only on the voltage magnitude at the fault point, synchronism is not required between the measurements obtained at each transmission line terminal. However, it permits the existence of two possible solutions for the fault location estimate under some fault conditions. Besides this fact, only non-solid three-phase faults can lead to a convergence error. To solve this problem, an auxiliary technique is developed. The results obtained from tests with fault conditions simulated with the Alternative Transients Program (ATP) show that the proposed approach has a negligible fault location error if the phasors and the transmission line parameters are accurate. For actual fault conditions, the fault location error magnitude is dependent on the quality of phasors and transmission line parameters.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos e Acrônimos	xx
1 Introdução	1
1.1 Breve Histórico: da Pilha aos Sistemas de Potência	1
1.2 Faltas em Sistemas de Potência	7
1.3 Conseqüências das Faltas em Sistemas de Potência	8
1.4 Importância de Uma Rápida Localização de Falta em Sistemas de Transmissão	9
1.5 Objetivo do Trabalho	11
1.6 Tipos de Faltas em Sistemas de Potência	12
1.7 Faltas Transitórias e Permanentes	12
1.8 Processamento de Sinais e Localização de Faltas	14
1.9 Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição	14
1.10 Divisão do Trabalho	15
2 Modelagem Matemática de Linhas de Transmissão	16
2.1 Notação Adotada	16
2.2 Linhas de Transmissão Curtas, Médias e Longas	19
2.3 Modelos Matemáticos de Linhas de Transmissão	21
2.4 Linhas de Transmissão Trifásicas	25
2.5 Conclusões	27
3 Ferramentas Matemáticas Utilizadas Por Métodos de Localização de Faltas	28
3.1 Decomposição de Sistemas Trifásicos	28
3.2 Decomposição em Componentes Simétricos	29
3.3 Transformação Modal	30
3.4 Princípio da Superposição Aplicado à Análise de Linhas de Transmissão em Falta	32

3.4.1	Modelagem de Uma Falta Através de Fontes de Tensão	32
3.4.2	Aplicação do Princípio da Superposição	34
3.4.3	Fator de Carga e Fator de Distribuição de Corrente	37
3.5	Conclusões	39
4	Revisão das Técnicas de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão	40
4.1	Classificação dos Métodos de Localização de Falhas	40
4.2	Métodos de Localização de Falhas Baseados no Conhecimento	41
4.3	Métodos de Localização de Falhas Baseados em Transitórios de Alta Frequência	43
4.3.1	Princípio Básico da Localização de Falhas Através de Ondas Viajantes	44
4.3.2	Exemplos de Algoritmos Baseados em Transitórios de Alta Frequência	46
4.4	Métodos de Localização de Falhas Baseados em Fasores de Frequência Fun-	
	damental	47
4.4.1	Princípio Básico dos Métodos Baseados em Fasores de Um Terminal	48
4.4.2	Principais Métodos Baseados em Fasores de Um Terminal	53
4.4.3	Efeito Resultante da Falta de Sincronismo Entre as Medidas Toma-	
	das nos Dois Terminais de Uma Linha de Transmissão	60
4.4.4	Princípio Básico dos Métodos Baseados em Fasores dos Dois Ter-	
	minais	61
4.4.5	Principais Métodos Baseados em Fasores dos Dois Terminais	63
4.4.6	Comentários a Respeito da Principais Fontes de Erro dos Métodos	
	Baseados em Fasores de Frequência Fundamental	66
4.5	Conclusões	71
5	Método de Localização de Falhas	72
5.1	Princípio Básico do Método Proposto	72
5.2	Extensão Para o Caso Trifásico	76
5.3	Sistema de Potência Sob Condição de Falta Padrão	77
5.4	Característica da Tensão ao Longo de Uma Linha de Transmissão	79
5.5	Descrição do Método de Localização de Falhas Proposto	80
5.6	Caso de Risco: Dois Pontos de Interseção Entre as Curvas $ V(x) $ e $ V(y) $.	88
5.6.1	Caso (a): Falhas Fase-Terra, Fase-Fase e Fase-Fase-Terra	90
5.6.2	Caso (b): Falhas Trifásicas Não-Sólidas	93
5.6.3	Técnica Desenvolvida Para a Redução da Possibilidade de Um Erro	
	de Convergência	95
5.6.4	Possíveis Condições de Teste da Estimativa de Localização de Falta	
	Obtida	100
5.6.5	Comparação Entre as Características das Funções $ V(x) $ e $ V(y) $	
	Para os Possíveis Tipos de Falta	102

5.7	Fluxograma	103
5.8	Conclusões	103
6	Resultados Obtidos	105
6.1	Condições Adotadas nas Simulações	105
6.2	Estudo da Variação da Localização da Falta	107
6.3	Estudo da Variação da Resistência de Falta	109
6.4	Estudo da Variação da Carga na Linha de Transmissão	113
6.5	Estudo da Variação do Tipo de Falta	113
6.6	Testes Experimentais Considerando Outras Linhas de Transmissão	119
6.7	Sensibilidade do Método Proposto a Erro de Sincronismo	126
6.8	Sensibilidade do Método Proposto a Erros nos Fasores e nos Parâmetros da Linha de Transmissão	132
6.8.1	Sensibilidade do Método Proposto a Erros nas Magnitudes dos Fasores	133
6.8.2	Sensibilidade a Erros nas Fases dos Fasores	135
6.8.3	Sensibilidade a Erros nos Parâmetros da Linha de Transmissão	137
6.9	Testes Experimentais a Partir de Dados de Faltas Reais	138
6.9.1	Caso Real 1	140
6.9.2	Caso Real 2	141
6.9.3	Caso Real 3	143
6.9.4	Caso Real 4	144
6.9.5	Comentários Sobre os Resultados Obtidos	145
6.10	Conclusões	146
7	Conclusões e Comentários Finais	147
A	Componentes Simétricos e Componentes de Clarke	150
A.1	Matrizes Impedância e Admitância	150
A.2	Decomposição em Componentes Simétricos	152
A.2.1	Matrizes Impedância e Admitância no Domínio da Decomposição em Componentes Simétricos	154
A.3	Transformação de Clarke	155
A.3.1	Matrizes Impedância e Admitância no Domínio Modal Para a Trans- formação de Clarke	157
A.4	Componentes de Clarke em Função dos Componentes Simétricos	158
B	Circuitos de Seqüência	162
B.1	Circuitos de Seqüência de Um Gerador Síncrono e de Uma Linha de Trans- missão	162

B.2	Circuitos de Seqüência do Sistema Completo	165
B.3	Conexão dos Circuitos de Seqüência	166
C	Determinação da Impedância Z_{SF1} Para a Condição de Falta Sólida	170
C.1	Variação da Tensão ao Longo da Linha de Transmissão	171
C.2	Expressões Para o Cálculo da Impedância Z_{SF1}	173
	Referências Bibliográficas	177

Lista de Figuras

1.1	Alessandro Volta e a pilha. (a) Nesta figura, pode-se ter uma idéia do tamanho das pilhas construídas por Volta. (b) Uma das primeiras pilhas construídas por Volta.	2
1.2	Pearl Street Electric Station. (a) Parte externa do prédio, localizado na ilha de Manhattan próximo às grandes instituições bancárias da época. (b) Dínamo movido por máquina a vapor usado na estação, que recebeu o apelido de jumbo por ser o maior exemplar construído até então.	3
1.3	Sistema em corrente contínua a três fios, que permitiu elevar a tensão de distribuição para 220 V e ao mesmo tempo utilizar lâmpadas incandescentes desenvolvidas para 110 V. Qualquer corrente oriunda de um desbalanço de carga retorna pelo fio “neutro”.	3
1.4	Transformadores Gaulard/Gibbs. (a) Exemplar de 1884, com núcleo aberto. (b) Exemplar de 1886, com núcleo fechado.	4
1.5	Hidrelétrica de Willamette Falls. (a) Parte externa da estação. (b) Parte interna da estação.	5
1.6	Exemplo de um sistema de potência moderno com etapas de geração, transmissão (subtransmissão), distribuição e consumo de energia elétrica.	6
1.7	Sistema Interligado Nacional (SIN), caracterizado por ser um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (fonte: www.ons.gov.br).	7
1.8	Possíveis tipos de falta em uma linha de transmissão. (a) Falta fase-terra (fase A). (b) Falta fase-fase (fases A e B). (c) Falta fase-fase-terra (fases A e B). (d) Falta trifásica.	13
2.1	Notação adotada para o modelo de sistema de potência trifásico estudado.	17
2.2	Notação adotada para as impedâncias série de uma linha de transmissão em falta.	17
2.3	Modelo a parâmetros concentrados de uma linha de transmissão curta, formado apenas pelos parâmetros série da linha.	22

2.4	Modelos a parâmetros concentrados de uma linha de transmissão média, formados pelos parâmetros série e em derivação da linha. (a) Modelo π . (b) Modelo T.	23
2.5	Linha de transmissão monofásica.	24
2.6	Linha de transmissão trifásica não-transposta.	25
2.7	Linha de transmissão transposta.	26
3.1	Componentes simétricos de uma grandeza trifásica $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]$	29
3.2	Exemplos de linhas de transmissão trifásicas com simetria vertical.	32
3.3	Diagrama unifilar de uma linha de transmissão com falta trifásica.	33
3.4	Circuito equivalente monofásico de uma linha de transmissão com falta trifásica.	33
3.5	Rede de pré-falta, equivalente ao circuito da Figura 3.4 para $t < t_F$. A tensão E_{Th} é definida como a tensão entre o ponto F e o neutro desta rede.	34
3.6	Rede de pós-falta, equivalente ao circuito da Figura 3.4 para $t \geq t_F$. A diferença de potencial nula entre o ponto F e o neutro é modelada a partir de duas fontes cujas tensões apresentam magnitude E_{Th} e defasagem de 180°	34
3.7	Princípio da superposição aplicado em uma linha de transmissão com falta sólida. (a) Rede de pós-falta. (b) Rede de pré-falta. (c) Rede de falta.	35
3.8	Princípio da superposição para uma linha de transmissão com falta de resistência R_F . (a) Rede de pós-falta. (b) Rede de pré-falta. (c) Rede de falta.	36
4.1	Classificação dos métodos de localização de faltas em linhas de transmissão em função do tipo de sinal empregado.	42
4.2	Diagrama de <i>lattice</i> para $d < \ell/2$	44
4.3	Linha de transmissão trifásica em falta.	47
4.4	Diagrama unifilar de uma linha de transmissão em falta.	48
4.5	Circuito equivalente de seqüência positiva para uma falta trifásica.	49
4.6	Representação gráfica da impedância Z_{SF}	50
4.7	Impedância aparente Z_a para $Z_{falta} = 0$ (falta sólida).	52
4.8	Impedância aparente Z_a para Z_{falta} real ($\beta = \theta = 0$).	52
4.9	Impedância aparente Z_a para Z_{falta} complexa. (a) Fase $-\beta - \theta > 0$. (b) Fase $-\beta - \theta < 0$	53
4.10	Modelagem baseada no princípio da superposição. (a) Rede de pós-falta. (b) Rede de pré-falta. (c) Rede de falta.	55
4.11	Representação gráfica da expressão (4.38). (a) Fator d_s real ($\beta = 0$). (b) Fator d_s imaginário ($\beta > 0$).	58
4.12	Linha de transmissão monofásica em regime permanente.	62
4.13	Linha de transmissão monofásica com falta no ponto F.	63

4.14	Influência da modelagem matemática da linha de transmissão no erro da estimativa de localização de falta fornecida pela expressão (4.43).	68
4.15	Posição do localizador de falta (LF) em relação à etapa de compensação série de uma linha de transmissão. (a) Localizador de falta instalado antes da compensação série da linha. (b) Localizador de falta instalado após a compensação série da linha.	70
5.1	Linha de transmissão monofásica sem falta.	73
5.2	Linha de transmissão monofásica com falta no ponto F.	74
5.3	Formas de onda de tensão no ponto F calculadas a partir das medidas dos terminais S [$v_{FS}(t)$] e R [$v_{FR}(t)$] da linha de transmissão.	76
5.4	Sistema de potência sob condição de falta definida como padrão.	77
5.5	Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão sob condição de falta padrão.	81
5.6	Linha de transmissão SR juntamente com as linhas de transmissão hipotéticas SF' e RF' em uma iteração k	82
5.7	Retas V_1 e V_2 que definem a estimativa inicial $d'(0)$	83
5.8	Linha de transmissão SR juntamente com as linhas de transmissão hipotéticas SF' e RF' para $k = 0$	84
5.9	Magnitudes das funções $V(x)$ para $0 \leq x \leq d'(0)$ e $V(y)$ para $0 \leq y \leq \ell - d'(0)$	85
5.10	Retas V_1 e V_2 na iteração $k = 1$	86
5.11	Magnitudes das funções $V(x)$ para $0 \leq x \leq \hat{d}$ e $V(y)$ para $0 \leq y \leq \ell - \hat{d}$ (última iteração).	88
5.12	Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 0$ ($\bar{d} = 0$).	90
5.13	Retas V_1 e V_2 para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (a) Valor inicial. (b) Primeira iteração.	92
5.14	Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$).	93
5.15	Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta trifásica sólida com $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$).	95
5.16	Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$. (a) Distância $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$). (b) Distância $d = 161 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).	101
5.17	Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ calculadas para $-2000 \leq x \leq 2000 \text{ km}$, considerando condições de falta com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$). (a) Falta fase-terra. (b) Falta fase-fase. (c) Falta fase-fase-terra. (d) Falta trifásica não-sólida.	102

5.18	Fluxograma simplificado do método de localização de faltas proposto. . . .	104
6.1	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 32,2 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,2$).	108
6.2	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 161 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).	109
6.3	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 100 \Omega$ e $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$).	111
6.4	Retas V_1 e V_2 para a condição de falta fase-terra com $R_F = 100 \Omega$ e $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$). (a) Etapa de definição do valor inicial $d'(0)$. (b) Primeira iteração.	112
6.5	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta padrão (falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 64,4 \text{ km}$), variando apenas a condição de carga na linha de transmissão. (a) Condição de carga (ii). (b) Condição de carga (iii). (c) Condição de carga (iv). (d) Condição de carga (v).	115
6.6	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 32,2 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 161 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).	117
6.7	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 32,2 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 161 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).	119
6.8	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 32,2 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$). (d) Distância $d = 96,6 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,6$).	120
6.9	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 300 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).	121
6.10	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 60 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 240 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 300 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).	124
6.11	Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 300 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).	125

6.12	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta trifásica localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 300$ km ($\bar{d} = 1,0$).	126
6.13	Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 60$ km ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 240$ km ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 300$ km ($\bar{d} = 1,0$).	127
6.14	Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$, $d = 64,4$ km e ângulo $\delta = 0$. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.	130
6.15	Fases de $V(x)$ e $V(y)$ para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$, $d = 64,4$ km e $\delta \neq 0$. (a) Ângulo $\delta = -10^\circ$. (b) Ângulo $\delta = +10^\circ$	131
6.16	Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ para o Caso 3 e distância $\bar{d} = 0,8$ ($d = 128,8$ km). (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.	135
6.17	Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 1. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.	141
6.18	Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 2. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.	142
6.19	Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 3. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.	144
6.20	Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 4. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.	145
A.1	Componentes de seqüência de um sistema trifásico resultantes da decomposição em componentes simétricos.	154
A.2	Exemplos de linhas de transmissão trifásicas com simetria vertical.	157
A.3	Decomposição de uma tensão trifásica V_f equilibrada. (a) Componentes simétricos. (b) Componentes de Clarke.	160
B.1	Diagrama unifilar de uma linha de transmissão em falta.	162
B.2	Gerador síncrono.	163
B.3	Circuitos de seqüência de um gerador síncrono. (a) Circuito de seqüência positiva. (b) Circuito de seqüência negativa. (c) Circuito de seqüência zero.	163
B.4	Circuitos de seqüência de uma linha de transmissão. (a) Circuito de seqüência positiva. (b) Circuito de seqüência negativa. (c) Circuito de seqüência zero.	164
B.5	Circuitos de seqüência do sistema trifásico da Figura B.1. (a) Circuito de seqüência positiva. (b) Circuito de seqüência negativa. (c) Circuito de seqüência zero.	165

B.6	Equivalentes Thévenin dos circuitos de seqüência da Figura B.5. (a) Circuito equivalente de seqüência positiva. (b) Circuito equivalente de seqüência negativa. (c) Circuito equivalente de seqüência zero.	166
B.7	Ligação dos circuitos de seqüência para faltas fase-terra.	167
B.8	Ligação dos circuitos de seqüência para faltas fase-fase.	167
B.9	Ligação dos circuitos de seqüência para faltas fase-fase-terra.	168
B.10	Ligação dos circuitos de seqüência para faltas trifásicas.	169
B.11	Circuito de seqüência positiva original, utilizado na análise de uma falta trifásica.	169
C.1	Linha de transmissão transposta com impedâncias próprias Z_p e mútuas Z_m	171
C.2	Linha de transmissão transposta com falta sólida do tipo fase-terra (fase A). Nesse caso, $V_{FA} = 0$	174
C.3	Linha de transmissão transposta com falta sólida do tipo fase-fase (fases A e B). Nesse caso, $I_A = -I_B$ e $V_{FA} = V_{FB}$	174
C.4	Linha de transmissão transposta com falta sólida do tipo fase-fase-terra (fases A e B). Nesse caso, $V_{FA} = V_{FB} = 0$	176
C.5	Linha de transmissão transposta com falta sólida trifásica.	176

Lista de Tabelas

1.1	Penalidades impostas a um sistema de transmissão específico de 500 kV, com receita assegurada (anual) de R\$ 132.583.563,79 (fonte: Reason Tecnologia S.A.)	11
1.2	Índices de ocorrência de cada tipo de falta em três linhas de transmissão	13
2.1	Valores típicos de tensão adotados nos níveis de distribuição, subtransmissão e transmissão de sistemas de potência	19
2.2	Valores típicos dos parâmetros de seqüência positiva das linhas de transmissão da Eletrosul	20
2.3	Valores típicos dos parâmetros de seqüência zero de linhas das transmissão da Eletrosul	20
2.4	Valores típicos da razão X/R das linhas de transmissão da Eletrosul	21
2.5	Classificação de uma linha de transmissão de acordo com o seu comprimento	21
2.6	Classificação de uma linha de transmissão de acordo com o parâmetro SIR	22
4.1	Expressões para o cálculo da impedância de seqüência positiva do trecho SF (Z_{SF1}) de uma linha de transmissão com falta sólida	49
4.2	Expressões utilizadas pelo método de Takagi para cada tipo de falta	57
4.3	Expressões utilizadas pelo método baseado em (4.41) para cada tipo de falta	59
4.4	Parâmetros de seqüência positiva e zero das linhas de transmissão simuladas	67
4.5	Demais parâmetros das simulações realizadas	67
5.1	Parâmetros do sistema de potência sob condição de falta padrão	78
5.2	Estimativas de localização de falta para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 0$ ($\bar{d} = 0$)	91
5.3	Estimativas de localização de falta para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8$ km ($\bar{d} = 0,8$)	94
5.4	Estimativas de localização de falta para a condição de falta trifásica sólida com $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$)	95
5.5	Valores iniciais para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8$ km ($\bar{d} = 0,8$), considerando $i = 3$	98

5.6	Estimativas de localização para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$), considerando como valor inicial $d'(0) = 130,219 \text{ km}$	98
6.1	Resultados obtidos para o sistema de potência sob condição de falta padrão	107
6.2	Resultados obtidos para condições de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e diferentes localizações do ponto de falta F	108
6.3	Resultados obtidos para condições de falta fase-terra com $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$) e diferentes valores de resistência de falta	110
6.4	Estimativas de localização de falta para condições de falta fase-terra com $R_F = 0$ e $R_F = 100 \Omega$, ambas com $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$)	112
6.5	Resultados obtidos considerando a ocorrência da falta padrão com diferentes condições de carga na linha de transmissão	114
6.6	Resultados obtidos para condições de falta de diferentes tipos com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$)	114
6.7	Resultados obtidos para condições de falta fase-fase com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão	116
6.8	Resultados obtidos para condições de fase-fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão	118
6.9	Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão, sem a utilização da técnica de definição de i valores iniciais. As linhas em destaque representam os casos em que ocorre erro de convergência	118
6.10	Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão, utilizando a técnica de definição de i valores iniciais ($i = 3$) apresentada na Seção 5.6.3	121
6.11	Parâmetros do sistema de potência com linha de transmissão baseada em parâmetros típicos de linhas de 500 kV da Eletrosul	122
6.12	Resultados obtidos para condições de falta fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul	123
6.13	Resultados obtidos para condições de falta fase-fase localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul	123
6.14	Resultados obtidos para condições de falta fase-fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul	125
6.15	Resultados obtidos para condições de falta trifásica localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul	126
6.16	Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul, sem a utilização da técnica de definição de i valores iniciais. As linhas em destaque representam os casos em que ocorre erro de convergência	128

6.17	Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul, utilizando a técnica de definição de i valores iniciais ($i = 3$)	128
6.18	Estimativas de localização de falta fornecidas pelo método proposto, considerando faltas fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão e considerando diferentes valores de erro de sincronismo δ . . .	129
6.19	Estimativas de localização de falta fornecidas pelo método de Johns/Jamali, considerando faltas fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão e considerando diferentes valores de erro de sincronismo δ .	129
6.20	Comparação entre o método de Johns/Jamali (I) e o método proposto (II) através dos erros de localização de falta das estimativas mostradas nas Tabelas 6.18 e 6.19	131
6.21	Diferentes condições de erros de magnitude nos fasores de tensão e corrente	133
6.22	Resultados obtidos para o Caso 1 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	133
6.23	Resultados obtidos para o Caso 2 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	134
6.24	Resultados obtidos para o Caso 3 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	134
6.25	Resultados obtidos para o Caso 4 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	135
6.26	Diferentes condições de erros de fase nos fasores de tensão e corrente . . .	136
6.27	Resultados obtidos para o Caso 7 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	136
6.28	Resultados obtidos para o Caso 8 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	136
6.29	Resultados obtidos para o Caso 9 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	137
6.30	Resultados obtidos para o Caso 10 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	137
6.31	Diferentes condições de erros na impedância série da linha de transmissão .	137
6.32	Resultados obtidos para o Caso 11 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	138
6.33	Resultados obtidos para o Caso 12 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	138
6.34	Resultados obtidos para o Caso 13 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	139

6.35	Resultados obtidos para o Caso 14 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)	139
6.36	Parâmetros do Caso Real 1	140
6.37	Resultados obtidos para o Caso Real 1. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso	141
6.38	Parâmetros do Caso Real 2	142
6.39	Resultados obtidos para o Caso Real 2. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso	143
6.40	Parâmetros do Caso Real 3	143
6.41	Resultados obtidos para o Caso Real 3. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso	143
6.42	Parâmetros do Caso Real 4	144
6.43	Resultados obtidos para o Caso Real 4. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso	145
C.1	Expressões para o cálculo da impedância de seqüência positiva do trecho SF (Z_{SF1}) de uma linha de transmissão com falta sólida	170

Lista de Símbolos e Acrônimos

*	operador complexo conjugado
\bar{d}	estimativa de localização de falta normalizada pelo comprimento da linha de transmissão
\bar{d}	distância do ponto de falta em relação ao terminal local normalizada pelo comprimento da linha de transmissão
β	fase do fator de distribuição de corrente
ΔV_A	fator queda de tensão ao longo da fase A de uma linha de transmissão
δ	defasagem entre os fasores dos terminais local e remoto causada pela medição não-sincronizada
ℓ	comprimento da linha de transmissão
ϵ	erro de localização de falta
γ	constante de propagação
\hat{d}	estimativa de localização de falta
λ	comprimento de onda de uma onda eletromagnética
\mathbf{I}_f	fasores de corrente de fase
\mathbf{i}_F	correntes temporais das fases A, B e C no ponto de falta
\mathbf{I}_{md}	correntes no domínio modal
\mathbf{i}_R	correntes temporais das fases A, B e C no terminal remoto
\mathbf{i}_S	correntes temporais das fases A, B e C no terminal local
\mathbf{T}	matriz de transformação
\mathbf{V}_f	fasores de tensão de fase

v_F	tensões temporais das fases A, B e C no ponto de falta
V_{md}	tensões no domínio modal
v_R	tensões temporais das fases A, B e C no terminal remoto
v_S	tensões temporais das fases A, B e C no terminal local
Y	matriz admitância da linha de transmissão por unidade de comprimento
Y_{md}	matriz admitância da linha de transmissão por unidade de comprimento no domínio modal
Z	matriz impedância da linha de transmissão por unidade de comprimento
Z_{md}	matriz impedância da linha de transmissão por unidade de comprimento no domínio modal
e	número de Euler, $e \cong 2,71828182$
Im	operador parte imaginária
j	unidade complexa $\sqrt{-1}$
Re	operador parte real
μ_0	constante de permeabilidade, aproximadamente $1,26 \times 10^{-6}$ H/m
ν	velocidade de propagação de uma onda viajante em uma linha de transmissão
ω	freqüência angular do sistema de potência em radianos por segundo
θ	fase do fator de carga
θ_{IR}	fase da corrente no terminal remoto da linha de transmissão
θ_{IS}	fase da corrente no terminal local da linha de transmissão
θ_{VR}	fase da tensão no terminal remoto da linha de transmissão
θ_{VS}	fase da tensão no terminal local da linha de transmissão
C	chave C
ϵ_0	constante de permissividade do espaço livre, aproximadamente $8,85 \times 10^{-12}$ F/m
A	parâmetro de um quadripolo: $A = D = \cosh(\gamma d)$
a	operador de rotação $a = 1e^{j120^\circ}$

a_1	coeficiente angular da reta V_1
a_2	coeficiente angular da reta V_2
B	parâmetro de um quadripolo: $B = Z_c \sinh(\gamma d)$
b_1	coeficiente linear da reta V_1
b_2	coeficiente linear da reta V_2
C	parâmetro de um quadripolo: $C = \sinh(\gamma d)/Z_c$
c	velocidade da luz, aproximadamente 3×10^8 m/s no vácuo
C_L	capacitância em derivação total da linha de transmissão
C_s	capacitância da etapa de compensação série
C_u	capacitância em derivação da linha de transmissão por unidade de comprimento
D	parâmetro de um quadripolo: $D = A = \cosh(\gamma d)$
d	distância do ponto de falta em relação ao terminal local
$d'(k)$	distância do ponto F' em relação ao terminal local da linha de transmissão na iteração k
d_s	fator de distribuição de corrente
E_R	fonte de tensão conectada no terminal remoto
E_S	fonte de tensão conectada no terminal local
E_{Th}	tensão Thévenin de circuito aberto
f	freqüência de operação do sistema de potência em hertz
$f(x)$	função custo
f_a	freqüência de amostragem
f_o	freqüência de oscilação da ressonância subsíncrona
G_u	condutância em derivação da linha de transmissão por unidade de comprimento
$I(x)$	fator de corrente em um ponto distante x do terminal local da linha de transmissão
$i(x,t)$	corrente na linha de transmissão em função da distância e do tempo

$I(y)$	fasor de corrente em um ponto distante y do terminal local da linha de transmissão
I_0	corrente de seqüência zero
I_{AB}	fasor de corrente entre as fases A e B da linha de transmissão
I_A	fasor de corrente da fase A da linha de transmissão
I_{BC}	fasor de corrente entre as fases B e C da linha de transmissão
I_B	fasor de corrente da fase B da linha de transmissão
I_{CA}	fasor de corrente entre as fases C e A da linha de transmissão
I_C	fasor de corrente da fase C da linha de transmissão
I_{FR}	fasor de corrente entre o ponto de falta e o terminal remoto da rede de pós-falta
I''_{FR}	fasor de corrente entre o ponto de falta e o terminal remoto da rede de falta
I'_{FR}	fasor de corrente entre o ponto de falta e o terminal remoto da rede de pré-falta
I_{FS}	fasor de corrente entre o ponto de falta e o terminal local da rede de pós-falta
I''_{FS}	fasor de corrente entre o ponto de falta e o terminal local da rede de falta
I'_{FS}	fasor de corrente entre o ponto de falta e o terminal local da rede de pré-falta
I_F	fasor de corrente de falta da rede de pós-falta
I''_F	fasor de corrente de falta da rede de falta
I'_F	fasor de corrente de falta da rede de pré-falta
I_L	fasor de corrente de carga, igual a I'_S
I_{RP}	corrente de pico no terminal remoto da linha de transmissão
I_R	fasor de corrente no terminal remoto da linha de transmissão
I_r	corrente residual
$i_R(t)$	corrente temporal no terminal remoto da linha de transmissão
I''_R	fasor de corrente no terminal remoto da rede de falta
I'_R	fasor de corrente no terminal remoto da rede de pré-falta
I_{SP}	corrente de pico no terminal local da linha de transmissão

I_S	fator de corrente no terminal local da linha de transmissão
$i_S(t)$	corrente temporal no terminal local da linha de transmissão
I_S''	fator de corrente no terminal local da rede de falta
I_S'	fator de corrente no terminal local da rede de pré-falta
K	grau de compensação série na linha de transmissão
k	número de cada iteração do método de localização de faltas proposto
$K(d)$	razão entre correntes utilizada pelo método de Takagi
k_v	fator de distância
L_u	indutância série da linha de transmissão por unidade de comprimento
m	índice que representa o modo ou seqüência adotado ($m = 0, 1$ ou 2)
N	número de fases de uma linha de transmissão
n	número de iterações necessárias para a convergência do método de localização de faltas proposto
n_s	fator de carga
q	critério de parada do método de localização de faltas proposto
R	resistência série total da linha de transmissão de seqüência positiva
R_a	resistência aparente vista pelo terminal local da linha de transmissão
R_F	resistência de falta
R_{SF}	resistência série entre o terminal local e o ponto de falta
R_u	resistência série da linha de transmissão por unidade de comprimento
t	tempo
t_δ	diferença temporal entre as bases dos terminais local e remoto da linha de transmissão
t_F	instante de ocorrência de uma falta
T_{R1}	tempo de chegada da primeira onda viajante no terminal remoto
T_{R2}	tempo de chegada da segunda onda viajante no terminal remoto

T_{S1}	tempo de chegada da primeira onda viajante no terminal local
T_{S2}	tempo de chegada da segunda onda viajante no terminal local
$V(x)$	fasor de tensão em um ponto distante x do terminal local da linha de transmissão
$v(x,t)$	tensão na linha de transmissão em função da distância e do tempo
$V(y)$	fasor de tensão em um ponto distante y do terminal local da linha de transmissão
V_0	fasor de tensão de seqüência zero ou do modo 0
V_1	fasor de tensão de seqüência positiva ou do modo 1
V_1	reta que aproxima a curva $ V(x) $ em cada iteração k
V_2	fasor de tensão de seqüência negativa do modo 2
V_2	reta que aproxima a curva $ V(y) $ em cada iteração k
V_{AB}	fasor de tensão entre as fases A e B da linha de transmissão
V_A	fasor de tensão da fase A da linha de transmissão
V_{BC}	fasor de tensão entre as fases B e C da linha de transmissão
V_B	fasor de tensão da fase B da linha de transmissão
V_{CA}	fasor de tensão entre as fases C e A da linha de transmissão
V_C	fasor de tensão da fase C da linha de transmissão
V_F	fasor de tensão no ponto de falta da rede de pós-falta
V_F''	fasor de tensão no ponto de falta da rede de falta
V_F'	fasor de tensão no ponto de falta da rede de pré-falta
V_{RP}	tensão de pico no terminal remoto da linha de transmissão
V_R	fasor de tensão no terminal remoto da linha de transmissão
$v_R(t)$	tensão no terminal remoto da linha de transmissão em função do tempo
V_R''	fasor de tensão no terminal remoto da rede de falta
V_R'	fasor de tensão no terminal remoto da rede de pré-falta
V_{SP}	tensão de pico no terminal local da linha de transmissão

V_S	fasor de tensão no terminal local da linha de transmissão
$v_S(t)$	tensão no terminal local da linha de transmissão em função do tempo
V_S''	fasor de tensão no terminal local da rede de falta
V_S'	fasor tensão no terminal local da rede de pré-falta
X	reatância indutiva total da linha de transmissão de seqüência positiva
X	reatância série da linha de transmissão
x	distância de um ponto qualquer da linha de transmissão em relação ao terminal local
x_1	primeiro ponto de interseção entre as curvas $ V(x) $ e $ V(y) $
x_2	segundo ponto de interseção entre as curvas $ V(x) $ e $ V(y) $
X_a	reatância aparente vista pelo terminal local da linha de transmissão
X_C	reatância do banco de capacitores
x_i	limite inferior de busca
X_{SF}	reatância série entre o terminal local e o ponto de falta
x_s	limite superior de busca
y	distância de um ponto qualquer da linha de transmissão em relação ao terminal remoto
Y_u	admitância em derivação da linha de transmissão por unidade de comprimento
Z_{AB}	impedância mútua entre as fases A e B da linha de transmissão
Z_A	impedância própria da fase A da linha de transmissão
Z_a	impedância aparente vista pelo terminal local da linha de transmissão
Z_{BC}	impedância mútua entre as fases B e C da linha de transmissão
Z_B	impedância própria da fase B da linha de transmissão
Z_{CA}	impedância mútua entre as fases C e A da linha de transmissão
Z_C	impedância própria da fase C da linha de transmissão
Z_c	impedância característica da linha de transmissão
Z_{falta}	impedância da falta vista pelo terminal local da linha de transmissão

Z_L	impedância série total da linha de transmissão
Z_m	impedância mútua de uma linha de transmissão transposta
Z_p	impedância própria de uma linha de transmissão transposta
Z_{RF}	impedância do trecho da linha de transmissão entre o terminal remoto e o ponto de falta
Z_R	impedância da fonte de tensão E_R conectada ao terminal remoto
Z_{SF}	impedância do trecho da linha de transmissão entre o terminal local e o ponto de falta
Z_S	impedância da fonte de tensão E_S conectada ao terminal local
Z_u	impedância série da linha de transmissão por unidade de comprimento

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ATP Alternative Transients Program

BPA Bonneville Power Administration

CA corrente alternada

CC corrente contínua

EAT extra alta tensão

F ponto da linha de transmissão sob falta

F' local arbitrado para o ponto de falta hipotético a cada iteração k

FE fonte de erro

GPS *global positioning system*

LF localizador de falta

LT linha de transmissão

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

QE qualidade de energia

R terminal remoto da linha de transmissão (*remote end*)

S terminal local da linha de transmissão (*sending end*)

SCADA *supervisory control and data acquisition*

SIN Sistema Interligado Nacional

SIR *source-to-line impedance ratio*

SSPB Swedish State Power Board

TC transformador de corrente

TP transformador de potencial

VTCD variação de tensão de curta duração

Capítulo 1

Introdução

1.1 Breve Histórico: da Pilha aos Sistemas de Potência

No ano de 1800, o físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) apresentou à Royal Society of London uma fonte de energia elétrica duradoura e estável [1], dispositivo que não podia ser implementado com as máquinas eletrostáticas construídas até então. Tal fonte de energia era constituída por diversos recipientes contendo solução ácida, ficando conhecida por cadeia de copos [2]. Os conteúdos dessa cadeia eram interligados em série através de arcos nos quais cada extremidade era formada por um tipo de metal: prata, zinco, cobre, estanho ou chumbo. Volta também criou um elemento mais compacto empilhando alternadamente discos de metais diferentes (cobre e zinco, por exemplo) separados por papel ou tecido embebido em solução de água, água e sal (cloreto de sódio) ou lixívia (geralmente carbonato de potássio). Por ser composto por um pilha de discos, esse dispositivo recebeu o nome de pilha voltaica¹ (Figura 1.1). Essa pilha rudimentar era capaz de fazer fluir uma corrente elétrica em um fio de material condutor, cujo efeito podia ser notado de alguma forma pelos órgãos sensoriais (língua, olhos, pele, nariz e ouvido) com exceção do nariz, pois não havia a criação de odores [2]. Apesar disso, o nível de tensão gerado pelas pilhas voltaicas era bastante limitado, na faixa de 1 a 2 V. Para obter tensões maiores era necessário conectar em série uma bateria de pilhas, razão pela qual surgiu o termo bateria. Em reconhecimento ao importante legado deixado por Volta para a utilização da eletricidade, a unidade de potencial elétrico no Sistema Internacional de Unidades é denominada volt.

Até meados da década de 1870, a bateria se manteve como a principal fonte prática de energia elétrica, sendo utilizada para alimentar telégrafos, telefones e sinais ferroviários bem como na realização da galvanoplastia². Naquela década, os primeiros geradores de cor-

¹Em sua carta submetida à Royal Society of London, Volta chamou a pilha de órgão elétrico artificial, pois notou uma certa semelhança no formato dos discos empilhados com os órgãos elétricos do peixe-torpedo, espécie marinha semelhante a uma arraia capaz de gerar uma descarga elétrica.

²Processo químico desenvolvido pelo fisiologista italiano Luigi Galvani (1737-1798), daí a origem do termo galvanização, no qual um metal é depositado sobre outro através de eletrólise para proteção e/ou decoração.

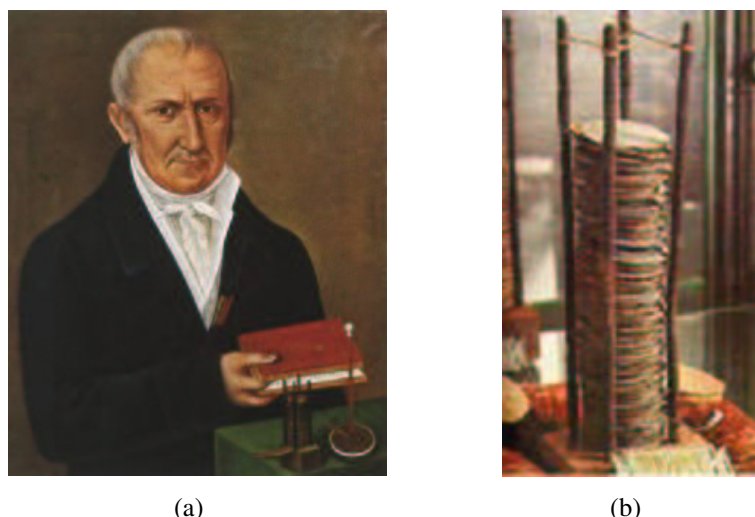


Figura 1.1: Alessandro Volta e a pilha. (a) Nesta figura, pode-se ter uma idéia do tamanho das pilhas construídas por Volta. (b) Uma das primeiras pilhas construídas por Volta.

rente contínua (CC) de interesse prático foram desenvolvidos. Eles se baseavam na lei de Faraday e usavam comutadores para converter a corrente alternada (CA) em CC (dínamos). Uma das aplicações iniciais dos geradores CC foi na iluminação pública através de lâmpadas a arco voltaico³, primeiramente na Europa e mais tarde nos Estados Unidos da América. Com o advento da lâmpada incandescente, apropriada para a iluminação de ambientes internos, determinadas lojas e residências bem como certos prédios comerciais passaram a utilizar geradores CC próprios para disponibilizar energia elétrica nas suas instalações.

O desejo das pessoas de dispor de eletricidade sem a necessidade de geração própria motivou a criação de estações comerciais de energia elétrica. Um marco inicial desse desenvolvimento ocorreu em setembro de 1879, quando a recém criada California Electric Light Company inaugurou uma pequena estação experimental na cidade de São Francisco constituída de três geradores Brush, com o objetivo de vender energia elétrica para o acionamento de lâmpadas a arco voltaico. O seu grande sucesso propiciou a construção de uma planta maior. Essas foram as primeiras centrais comerciais de energia elétrica do mundo [3]. Em 12 de janeiro de 1882, entrou em operação em Londres a estação de Holborn Viaduct, que fornecia energia elétrica para 3000 lâmpadas incandescentes a partir de dínamos rotacionados por máquinas a vapor. A mais famosa central comercial de energia elétrica da época foi inaugurada em 4 de setembro de 1882 na cidade de Nova Iorque. Ela foi idealizada por Thomas Alva Edison (1847-1931) e se chamava Pearl Street Electrical Station (Figura 1.2) [4]. O sistema operava a três fios (Figura 1.3) e supria energia elétrica para o acionamento de

³Precursoras das lâmpadas de descarga de mercúrio e sódio modernas. Sua operação se baseia no efeito descoberto em 1801 pelo químico inglês Sir Humphry Davy (1778-1829), que verificou a criação de um arco elétrico entre duas peças próximas de carbono alimentadas via bateria. Como as baterias da época não eram suficientemente potentes para gerar um arco estável, a primeira aplicação desse dispositivo ocorreu apenas em 1863 em um dos dois faróis de La Hève [3], França, alimentado via gerador CC movido por máquina a vapor.

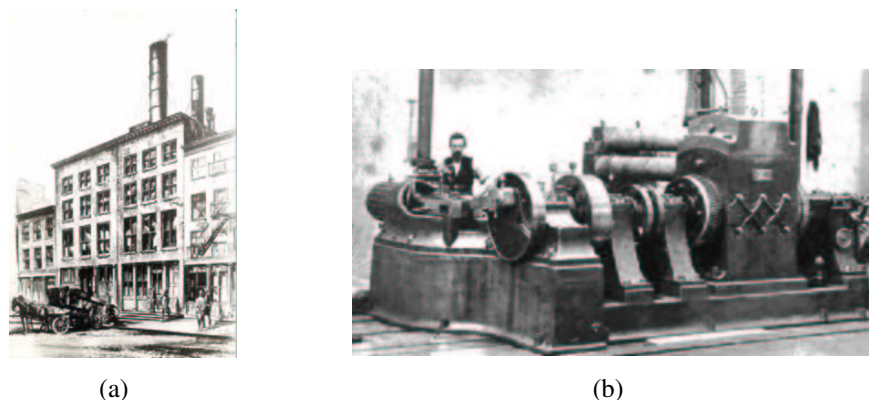


Figura 1.2: Pearl Street Electric Station. (a) Parte externa do prédio, localizado na ilha de Manhattan próximo às grandes instituições bancárias da época. (b) Dínamo movido por máquina a vapor usado na estação, que recebeu o apelido de jumbo por ser o maior exemplar construído até então.

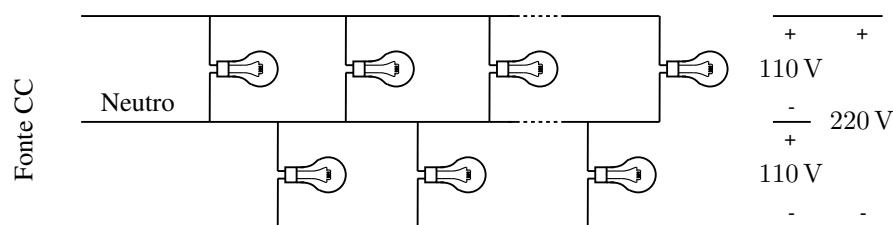


Figura 1.3: Sistema em corrente contínua a três fios, que permitiu elevar a tensão de distribuição para 220 V e ao mesmo tempo utilizar lâmpadas incandescentes desenvolvidas para 110 V. Qualquer corrente oriunda de um desbalanço de carga retorna pelo fio “neutro”.

lâmpadas incandescentes que totalizavam uma carga de 30 kW. Apesar do sucesso que obtiveram, a área servida por essas primeiras plantas comerciais em CC era bastante reduzida, uma vez que o alto custo dos condutores de cobre, que apresentavam grande bitola devido às baixas tensões de distribuição, tornava proibitiva a transmissão a longas distâncias [5]. Por exemplo, a Pearl Street Electric Station atendia 59 consumidores localizados em uma área de apenas uma milha quadrada.

Ainda em 1882, o cientista francês Lucien Gaulard (1850-1888) e o engenheiro inglês John Dixon Gibbs⁴ patentearam o primeiro sistema de distribuição de energia elétrica em CA, fato que marca o início do desenvolvimento dos sistemas de potência em CA. Tal sistema utilizava dispositivos que mais tarde foram denominados transformadores⁵ (Figura 1.4). Apesar de o transformador não ser uma novidade para a época, o dispositivo desenvolvido por Gaulard e Gibbs foi o primeiro capaz de operar com altas potências, além de apresentar uma construção relativamente fácil. Um inconveniente do sistema de distribuição Gaulard/Gibbs era o fato de possuir os primários dos transformadores ligados em

⁴Sobre quem se desconhecem maiores informações.

⁵À época, o dispositivo desenvolvido por Gaulard e Gibbs foi denominado *secondary generator*.

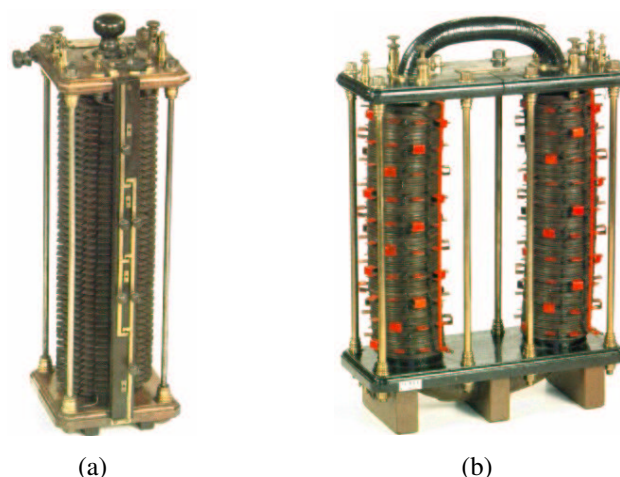


Figura 1.4: Transformadores Gaulard/Gibbs. (a) Exemplar de 1884, com núcleo aberto. (b) Exemplar de 1886, com núcleo fechado.

série com a linha de transmissão (LT). Essa característica dificultava a regulação de tensão, cujo valor variava significativamente com a inclusão ou retirada de lâmpadas. Em 1885, George Westinghouse (1846-1914) comprou as patentes americanas referentes ao sistema Gaulard/Gibbs. Foi a partir desse momento que o transformador começou realmente a ser utilizado na prática. O problema da variação de tensão inerente ao sistema Gaulard/Gibbs foi resolvido por William Stanley (1858-1916), funcionário de Westinghouse. A solução por ele encontrada foi ligar os primários dos transformadores em paralelo com a LT. Além de melhorar a regulação de tensão, tal procedimento permitiu utilizar transformadores elevadores e abaixadores de tensão de acordo com a necessidade. Além disso, Stanley alterou a estrutura do transformador Gaulard/Gibbs [6] de modo a facilitar a sua construção em série [7], dispositivo que pode ser considerado o protótipo dos transformadores de potência modernos [8]. Em 1885/1886, Stanley implementou um sistema experimental de distribuição em CA usado durante duas semanas para alimentar cerca de 400 lâmpadas incandescentes [9]. Essa estrutura se tornou parte do primeiro sistema de potência comercial em CA dos Estados Unidos da América, localizado na cidade de Búfalo, Nova Iorque [8]. Outro personagem de destaque no desenvolvimento dos sistemas de potência em CA foi Nikola Tesla (1856-1943), engenheiro eletricitista nascido na vila de Smiljan, atual Croácia (à época parte do Império Austro-Húngaro). Tesla desenvolveu os conceitos de campos magnéticos girantes, de sistemas polifásicos de geração e distribuição de energia elétrica e do motor de indução CA. Ele requisitou um total de sete patentes americanas, todas compradas por Westinghouse, que compreendiam um sistema CA completo, com geradores, transformadores, LTs, motores polifásicos e iluminação [10]. O seu trabalho foi tão grandioso que Tesla é considerado o pai da tecnologia em CA e dos sistemas elétricos polifásicos [8].

Em 1888, teve início uma disputa conhecida como “*the battle of the currents*” [8], que girava em torno da forma mais eficiente e segura de se lidar com a energia elétrica: em

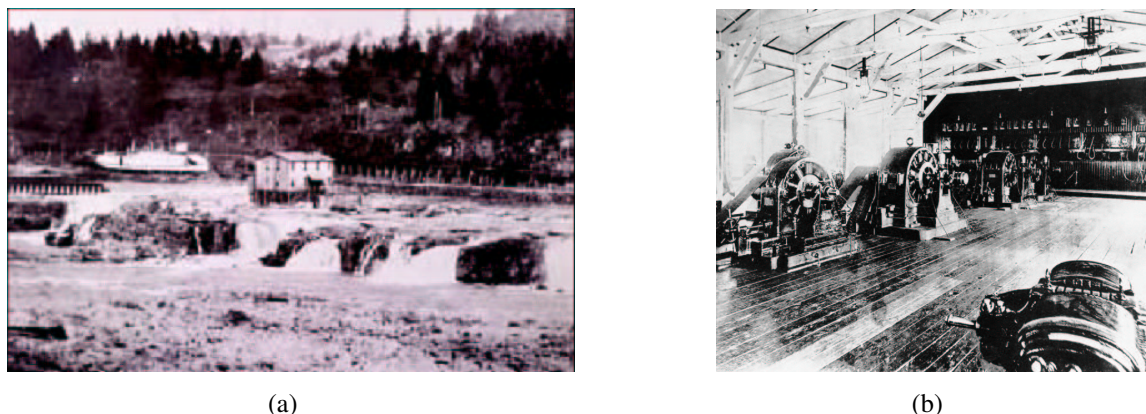


Figura 1.5: Hidrelétrica de Willamette Falls. (a) Parte externa da estação. (b) Parte interna da estação.

CC ou CA, vertentes lideradas por Edison e Westinghouse, respectivamente. Com o tempo, os sistemas elétricos em CA acabaram se firmando como um padrão mundial⁶ devido principalmente aos seguintes motivos [4]:

- o transformador é capaz de alterar facilmente os níveis de tensão e corrente, o que permite a transmissão de energia elétrica a longas distâncias (alta tensão);
- os geradores CA são inerentemente mais simples do que os geradores CC;
- embora não tão versáteis quanto os motores CC, os motores CA são mais simples e apresentam menor custo.

Um outro ponto fundamental para a evolução dos sistemas de potência foi o desenvolvimento das LTs aéreas. A primeira linha CA do mundo (monofásica) entrou em operação em 1890⁷. Ela transportava a energia elétrica produzida pela usina hidrelétrica de Willamette Falls (Figura 1.5) até a cidade de Portland, Oregon [14]. Essa linha tinha um comprimento de cerca de 20 km e operava com uma tensão de transmissão de 4 kV, que era reduzida para 50 V no nível de distribuição [15]. A mais importante LT CA (trifásica) desse estágio inicial de evolução dos sistemas de potência foi construída em 1891 na Alemanha, ligando a cidade de Lauffen até a Frankfurt Electro-Technical Exposition. A transmissão se dava em 30 kV, a uma distância de aproximadamente 175 km [3].

⁶Vale destacar que a transmissão de energia elétrica acima de uma certa distância, cerca de 700 km [11], através de elos em CC vem ganhando crescente atenção atualmente. Nesse tipo de transmissão, não há limites impostos por condições de estabilidade e, diferentemente de LTs CA de alta tensão, a compensação de potência reativa é naturalmente desnecessária [12]. Como curiosidade, o elo CC de Itaipu, composto por dois bipolos de ± 600 kV em relação à terra, é um dos maiores do mundo tanto em distância percorrida (810 km) quanto em potência transmitida (6000 MW).

⁷Na realidade, a primeira LT do mundo foi construída em 1882 entre as cidades de Miesbach e Munich, na Alemanha [13]. Essa LT experimental, que operava com um nível de tensão CC de 2400 V e possuía um comprimento de 59 km, não obteve êxito devido às sérias dificuldades na isolação [3].

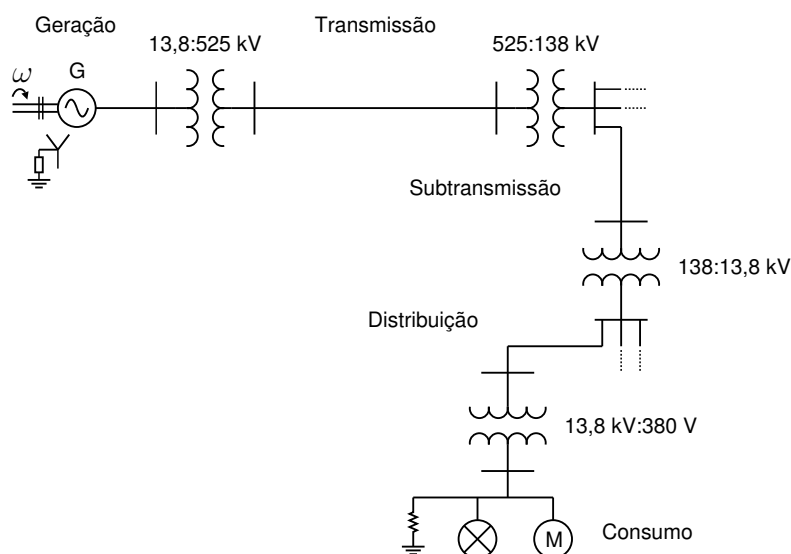


Figura 1.6: Exemplo de um sistema de potência moderno com etapas de geração, transmissão (subtransmissão), distribuição e consumo de energia elétrica.

Com o passar dos anos, os sistemas de potência foram se tornando estruturas complexas. O número de consumidores de energia elétrica foi aumentando gradativamente e as cargas deixaram de ser unicamente do tipo resistivo. Um sistema de potência moderno pode ser dividido em quatro níveis distintos: geração, transmissão, distribuição e consumo. A Figura 1.6 apresenta o diagrama unifilar bastante simplificado de um sistema de potência com cada uma dessas etapas. A energia elétrica é gerada nas usinas (hidrelétricas, termelétricas ou nucleares, por exemplo), transmitida principalmente através de LTs aéreas, distribuída e vendida pelas concessionárias aos consumidores, que a convertem em outros tipos de energia de acordo com as suas necessidades.

A fim de aumentar a sua confiabilidade (continuidade do serviço), um sistema de potência moderno possui redes interligadas no seu nível de transmissão, o que requer a operação de um grande número de LTs. Como exemplo, a Figura 1.7 apresenta a interligação eletroenergética do Sistema Interligado Nacional⁸ (SIN). Além de elevar a confiabilidade do sistema, essa interligação possibilita o intercâmbio de energia elétrica entre diferentes regiões [16]. Tal propriedade é especialmente relevante em um país como o Brasil, que utiliza usinas hidrelétricas como principal forma de geração de energia elétrica devido ao seu grande potencial hídrico. Como as diversas regiões do Brasil atendidas pelo SIN apresentam ciclos hidrológicos distintos, a interligação do sistema permite que durante o período de chuvas de uma determinada região ela forneça energia elétrica para outras partes do sistema que estejam enfrentando períodos de seca. Outro ponto importante é que a geração de energia elétrica a partir de usinas hidrelétricas ocorre, em geral, longe dos grandes centros

⁸Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do Brasil encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (fonte: www.ons.org.br).



Figura 1.7: Sistema Interligado Nacional (SIN), caracterizado por ser um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (fonte: www.ons.gov.br).

consumidores. Assim, as LTs de um sistema de potência como o SIN apresentam, em geral, comprimentos consideráveis.

1.2 Faltas em Sistemas de Potência

Sob operação normal, um sistema de potência trifásico é equilibrado e simétrico. Entretanto, certos incidentes podem fazer com que o sistema deixe de operar nessa condição temporariamente. Uma dessas situações indesejáveis são as faltas, que podem ser faltas de curto-circuito ou de circuito aberto. Uma falta de circuito aberto surge devido a condutores em aberto (corrente nula). Já uma falta de curto-circuito ocorre quando a corrente elétrica flui por um caminho indevido (corrente elevada). A partir deste ponto, o termo falta será utilizado para designar somente faltas de curto-circuito, uma vez que este trabalho considera apenas faltas desse tipo.

Vários equipamentos que constituem um sistema de potência podem apresentar defeitos, tais como as LTs, os transformadores, os geradores e os equipamentos de manobra, controle, medição e proteção. Em sistemas de transmissão, o componente mais vulnerável a falhas são as LTs. Tal fato ocorre devido às suas grandes dimensões (comprimento) e também

porque essas linhas ficam expostas a toda sorte de intempéries. As faltas em LTs podem ser causadas por diversos fatores, que dependem da região na qual o sistema de potência opera. Alguns exemplos de agentes causadores de faltas em LTs são:

- fenômenos naturais, como descargas atmosféricas, tempestades, chuvas de granizo, ventos fortes e excesso de gelo sobre linhas;
- curtos-circuitos causados por galhos de árvores, pássaros ou outros animais;
- acidentes, como veículos que colidem em torres de sustentação ou objetos voadores (aeronaves e balões, por exemplo) que se chocam contra linhas aéreas;
- falhas de componentes do próprio sistema, como isoladores que perdem a capacidade de isolamento;
- queimadas;
- vandalismo.

Uma eventual falta em uma LT deve ser localizada para que se inicie a etapa de manutenção. O primeiro método utilizado para tal fim consistia de uma simples inspeção visual [17]. Porém, como mencionado anteriormente, os sistemas de potência se tornaram estruturas complexas com o passar dos anos, com muitas LTs percorrendo grandes distâncias. Com isso, a tarefa de localização de faltas em LTs vem se tornando cada vez mais onerosa. Além disso, as faltas acontecem frequentemente sob condições meteorológicas adversas (chuva ou neve, por exemplo), no final da tarde ou durante a noite bem como em locais de difícil acesso. Esses fatores acabam por complicar ainda mais a localização visual do ponto de falta. Com o intuito de agilizar o trabalho das equipes de manutenção, e assim reduzir o tempo de restabelecimento da operação normal da linha, diversos localizadores de faltas em LTs vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1950 [17], [18].

1.3 Conseqüências das Faltas em Sistemas de Potência

Os sistemas de potência possuem dispositivos de proteção que servem para isolar eventuais faltas, tais como relés de proteção, disjuntores e fusíveis. Caso a etapa de proteção do sistema falhe ou demore a isolar o defeito, graves conseqüências podem ocorrer, tais como perda de estabilidade, danos a equipamentos vizinhos ao local da falha, incêndios, explosões e o surgimento de faltas em cascata. As considerações apresentadas a partir deste ponto levam em conta que a falta foi isolada dentro do tempo correto pelos mecanismos de proteção do sistema de potência.

A conseqüência mais conhecida de uma falta são as interrupções do fornecimento de energia elétrica, fenômeno relacionado com a confiabilidade do sistema. Além disso, uma

falta também pode causar a chamada variação de tensão de curta duração (VTCD). Esse tipo de ocorrência está relacionado com a chamada qualidade de energia (QE) [19], [20], área que vem ganhando uma atenção crescente nos últimos anos. Uma VTCD pode se caracterizar por um salto de tensão (*swell*)⁹ ou por um afundamento de tensão (*sag*)¹⁰ [22], podendo em ambos os casos danificar equipamentos elétricos bem como interromper processos produtivos. O afundamento de tensão é o tipo de VTCD que apresenta maior frequência de ocorrência. Segundo um estudo realizado pelos Bell Labs¹¹, afundamentos de tensão representam aproximadamente 87 % das perturbações relacionadas à QE [23].

Em geral, faltas nos níveis de transmissão e distribuição causam efeitos diferentes em um sistema de potência. Como os sistemas de potência possuem redes interligadas no nível de transmissão, uma perturbação originada nesse nível se propaga para vários outros pontos do sistema. Assim, uma falta no nível de transmissão causa, em geral, um afundamento de tensão abrangendo um grande número de usuários, mas sem interrupção do fornecimento de energia elétrica. No nível de distribuição, a interligação do sistema é menor (menor confiabilidade), predominando as chamadas redes radiais. Sendo assim, uma falta nesse nível causa um afundamento de tensão para um número menor de usuários (menor interligação), mas interrompe o fornecimento de energia elétrica para determinados grupos de consumidores (menor confiabilidade).

Uma falta pode causar enormes prejuízos. Por exemplo, a interrupção de um processo industrial, seja por uma interrupção propriamente dita ou por alguma anormalidade na tensão de alimentação, pode resultar em custos adicionais substanciais, tais como perda de produção, custos de mão-de-obra para limpeza e recolocação em operação, produtos danificados ou de baixa qualidade, atrasos na entrega, insatisfação do cliente e possíveis danos aos equipamentos de produção. Para se ter uma idéia em termos de valores, a interrupção de um processo de fabricação de *wafers* semicondutores representa um prejuízo que varia entre 30 mil e 1 milhão de dólares [24].

1.4 Importância de Uma Rápida Localização de Falta em Sistemas de Transmissão

No caso de uma falta causar a interrupção do fornecimento de energia elétrica, é evidente a importância de localizar o ponto da LT defeituoso de forma rápida, a fim de

⁹De acordo com [21], um *swell* é caracterizado pelo aumento do valor eficaz da tensão ou corrente de frequência fundamental com duração entre meio ciclo e 1 min. Valores típicos desse aumento estão na faixa entre 1,1 e 1,8 pu.

¹⁰De acordo com [21], um *sag* ou *dip* é caracterizado pela diminuição do valor eficaz da tensão ou corrente de frequência fundamental na faixa entre 0,1 e 0,9 pu, com duração entre meio ciclo e 1 min.

¹¹Diversos centros de pesquisa científica e tecnológica localizados em mais de dez países pertencentes à empresa norte-americana Alcatel-Lucent. Suas origens remontam aos Laboratórios Telefônicos Bell, fundados em 1925 em Nova Jérsei pela empresa AT&T.

restabelecer a curto prazo a operação normal do sistema. Outro argumento que destaca a importância de uma rápida localização de falta relaciona-se com a confiabilidade do sistema de potência. Apesar de a interligação dos sistemas de transmissão permitir que a energia que estava sendo transmitida por uma linha faltosa seja redirecionada para LTs sãs, a confiabilidade do sistema diminui nesse tipo de situação devido ao menor número de LTs operacionais. Em sistemas que operam cada vez mais próximos dos seus limites máximos de transmissão, tal fato é relevante.

Outro aspecto importante relacionado com a localização de faltas em LTs é a tendência mundial de desregulamentação dos setores de energia elétrica [25]. Em ambientes desregulamentados, cria-se a concorrência na geração e na comercialização de energia elétrica. Para isso, é necessário separar claramente as etapas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (Figura 1.6), processo chamado de desverticalização. Diferentemente das atividades de geração e comercialização, a transmissão de energia elétrica é considerada um monopólio natural [26]. Devido à ausência de concorrência, as empresas de transmissão precisam ser controladas por um agente regulador em mercados desregulamentados. Tal agente adota critérios técnicos e econômicos a fim de forçar as empresas de transmissão a manterem a continuidade dos seus serviços. Dentre outros aspectos, essas legislações estipulam penalidades de acordo com o tempo que uma LT fica inoperante. Assim, para que uma empresa de transmissão possa diminuir as suas penalidades, é importante que ela seja capaz de localizar de forma rápida eventuais faltas em suas LTs.

No caso do Brasil, o papel de agente regulador cabe à Agência Nacional de Energia Elétrica¹² (ANEEL). A regulamentação da atividade de transmissão no país pode ser resumida da forma descrita a seguir¹³. Cada empresa de transmissão firma um contrato de prestação de serviços de transmissão com o Operador Nacional do Sistema Elétrico¹⁴ (ONS). Um dos pontos desse contrato estipula as penalidades que a empresa sofre devido a eventuais faltas de continuidade de serviço. Simplificadamente, pode-se dizer que a receita de uma empresa de transmissão é dada pela receita assegurada (fixada em contrato) diminuída de uma parcela variável (penalidades), que dependem do número de desligamentos (programados ou intempestivos) e do tempo total de cada um desses desligamentos. Portanto, uma possível estratégia para diminuir as penalidades e assim aumentar a receita de uma empresa de transmissão de energia elétrica que opere no Brasil é reduzir a duração dos desligamentos intempestivos (não-programados). Para isso, a localização rápida do ponto de falta é fundamental. Para se ter uma idéia em termos de valores, a Tabela 1.1 apresenta as penalidades impostas a cada hora em que um sistema de transmissão específico fica inoperante em função

¹²Autarquia em regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, criada pela Lei 9.427 de 26 de dezembro de 1996.

¹³A referência [26] apresenta de forma detalhada a regulamentação da atividade de transmissão de energia elétrica no mercado brasileiro.

¹⁴Sociedade civil de direito privado, sem fins lucrativos, criada pela Lei 9.648/98 e pelo Decreto 2.655/98. Sua finalidade é operar o SIN e administrar a Rede Básica de transmissão de energia elétrica brasileira.

Tabela 1.1: Penalidades impostas a um sistema de transmissão específico de 500 kV, com receita assegurada (anual) de R\$ 132.583.563,79 (fonte: Reason Tecnologia S.A.)

Elemento	Parcela variável por hora de indisponibilidade (R\$)	
	Deslig. programado	Deslig. não-programado
Linha e banco de reatores	50.986,31	764.794,67
Banco de transformadores	6.730,15	100.952,19
Banco de capacitores	15.058,91	225.883,64

do elemento causador da interrupção. Note que o custo resultante de uma hora de inoperância da LT é significativo, em torno de 0,6 % da receita assegurada anual desse sistema de transmissão.

1.5 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é propor um novo algoritmo de localização de faltas em LTs [27], [28] (nível de transmissão, ver Figura 1.6). Apesar de existirem diversas abordagens de localização de faltas apresentadas na literatura, esta é uma área ainda aberta a desenvolvimentos. O método proposto considera como variáveis de entrada os fasores de pós-falta extraídos das medidas de tensão e corrente tomadas em ambos os terminais da LT. O ponto de falta é determinado através de um processo iterativo, que utiliza apenas as estimativas das magnitudes dos fasores de tensão ao longo da linha como variável de busca, que são calculadas a partir dos fasores de tensão e corrente dos dois terminais da LT. Tal estratégia torna a abordagem proposta independente de sincronismo entre as medidas de tensão e corrente tomadas nos dois terminais da LT.

A localização de faltas através de medidas não-sincronizadas torna o custo do processo de localização menor, visto que é desnecessária a utilização de dispositivos de sincronização tal como um *global positioning system* (GPS) para fornecer uma base de tempo comum aos instrumentos de medida instalados em ambos os terminais da LT. Outro ponto a se considerar é que mesmo em situações em que tal equipamento é usado, não se está totalmente isento de eventuais erros de sincronismo. Além disso, métodos baseados em fasores não-sincronizados podem fornecer melhores resultados caso haja erros devido ao uso de diferentes taxas de amostragem ou erros de fase introduzidos pelos diversos instrumentos de medida e transdutores [29], [30].

A literatura da área apresenta alguns métodos de localização de faltas baseados em medidas não-sincronizadas. Essa falta de sincronismo acresce um ângulo δ à diferença angular existente entre os fasores dos dois terminais da LT (ver Seção 4.4.3), defasagem essa oriunda do fluxo de potência na LT. Assim, os trabalhos desse tipo se dividem basicamente

em duas diferentes classes (ver Figura 4.1). Uma linha de atuação propõe determinar o ângulo δ através da solução de equações não-lineares antes da estimação da localização da falta [29], [31]. Além de ser uma etapa a mais de processamento, um erro na estimativa de δ , que é feita a partir de medidas de tensão e corrente dos dois terminais da LT, resulta no aumento do erro da estimativa de localização de falta. Uma segunda classe de algoritmos de localização é independente de δ [32], [33], mas necessita da informação das impedâncias equivalentes das fontes conectadas aos terminais da LT, cuja modelagem é imprecisa. Um fator que merece destaque é que a maioria dos métodos baseados em medidas não-sincronizadas propostos até o momento utiliza modelos a parâmetros concentrados para a LT. Como em geral as LTs apresentam grandes comprimentos, uma modelagem baseada em parâmetros distribuídos é bem mais realista do que uma que considere parâmetros concentrados [34]. Para fins de comparação, o método proposto neste trabalho se enquadra no segundo grupo (não necessita determinar o ângulo δ), com as vantagens de não requerer o conhecimento das impedâncias equivalentes conectadas aos terminais da linha e de adotar um modelo a parâmetros distribuídos para a LT. De acordo com a revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa, não existe outro método de localização de faltas baseado em fasores não-sincronizados que apresente tais características simultaneamente. As contribuições deste trabalho são apresentadas ao longo do texto e resumidas nas conclusões.

1.6 Tipos de Faltas em Sistemas de Potência

As faltas em sistemas de potência podem acontecer de quatro formas diferentes. De acordo com [4], elas podem ser classificadas em ordem decrescente de frequência de ocorrência nos tipos fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica (Figura 1.8). Por ser o tipo de maior incidência, as faltas fase-terra são as que apresentam maior interesse prático. A Tabela 1.2 apresenta um levantamento dos índices de ocorrência dos diferentes tipos de falta em três LTs [35]: de 500 kV, da Bonneville Power Administration¹⁵ (BPA); de 400 kV e 200 kV, da Swedish State Power Board¹⁶ (SSPB). Os resultados de tal pesquisa corroboram a maior incidência de faltas fase-terra em LTs. Pode-se notar que esse índice é crescente com o nível de tensão de transmissão da linha.

1.7 Faltas Transitórias e Permanentes

Uma falta pode ser transitória ou permanente. Como o próprio nome indica, as faltas permanentes são irreversíveis. Após a atuação da proteção, o fornecimento de energia elétrica não poderá ser restabelecido sem que antes sejam efetuados os devidos reparos na

¹⁵Agência federal controlada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América.

¹⁶Organização estatal sueca de energia elétrica.

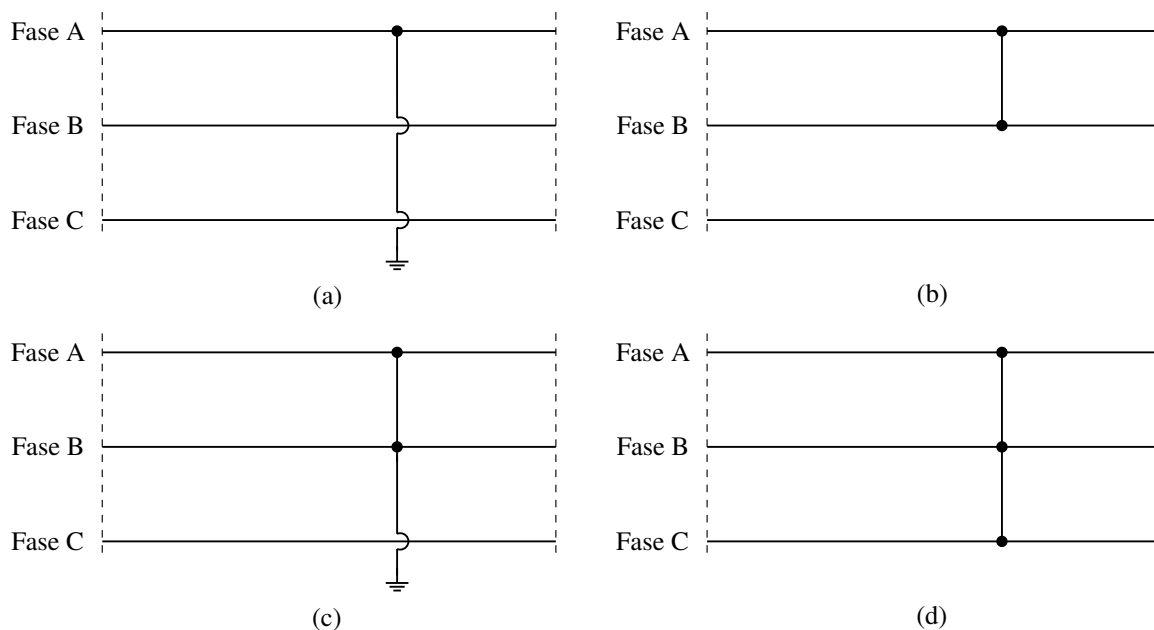


Figura 1.8: Possíveis tipos de falta em uma linha de transmissão. (a) Falta fase-terra (fase A). (b) Falta fase-fase (fases A e B). (c) Falta fase-fase-terra (fases A e B). (d) Falta trifásica.

Tabela 1.2: Índices de ocorrência de cada tipo de falta em três linhas de transmissão

Tipo de falta	BPA	SSPB	
	500 kV	400 kV	200 kV
Fase-terra	93 %	70 %	56 %
Fase-fase	4 %	23 %	27 %
Fase-fase-terra	2 %	7 %	17 %
Trifásica	1 %		

rede defeituosa. Uma falta permanente pode ocorrer, por exemplo, devido ao rompimento de condutores. A localização de faltas permanentes é o caso clássico para a aplicação de algoritmos de localização de faltas.

As faltas transitórias são aquelas que ocorrem sem danos físicos ao sistema de potência. Isso significa que a operação normal do sistema de potência poderá ser restabelecida sem maiores dificuldades após a atuação da etapa de proteção. Apesar disso, também é importante identificar o ponto de ocorrência de uma falta transitória, visto que tal procedimento permite que se realize, quando for o caso, uma manutenção preventiva na rede de modo a evitar o surgimento de novas faltas e possíveis danos futuros. Os algoritmos de localização das faltas também são usados para identificar esse tipo de ocorrência, cuja localização visual é, em geral, mais difícil. Uma falta transitória pode ser causada, por exemplo, por galhos de árvore que se aproximam demais das linhas quando da ocorrência de ventos fortes bem como por isoladores parcialmente danificados, que perdem a capacidade de isolamento sob

certas condições climáticas. Nesses casos, uma manutenção preventiva pode evitar o surgimento de novas faltas. Tais situações são diferentes dos casos de faltas transitórias causadas, por exemplo, por descargas atmosféricas, em que uma manutenção preventiva na rede é desnecessária.

1.8 Processamento de Sinais e Localização de Faltas

Assim como em diversos ramos da engenharia, a área de sistemas de potência também faz uso intensivo de técnicas de processamento de sinais. No caso específico de localização de faltas, os algoritmos utilizam como dado de entrada, em geral, sinais de tensão e corrente medidos em um ou nos dois terminais da LT. Antes de serem medidas, tais grandezas são reduzidas para níveis mais seguros através de transformadores de potencial (TPs) e de corrente (TCs). Em seguida, as referidas variáveis são medidas e armazenadas. Diversas ferramentas de processamento de sinais podem ser usadas no tratamento dos dados em questão. Os métodos de localização de faltas que utilizam os fasores de frequência fundamental são os mais usados na prática [36]. Para extrair os fasores de um sinal de falta, que possui componentes exponenciais e de alta frequência, utilizam-se, por exemplo, etapas de filtragem. A determinação dos fasores é então feita através de filtros estimadores. Tais filtros podem ser baseados, por exemplo, no método dos erros quadráticos mínimos [37], na transformada discreta de Fourier [38] ou na filtragem de Kalman [39], [40]. Outros métodos de localização de faltas utilizam ainda os transitórios de alta frequência causados pela falta. Nesse caso, ferramentas tais como transformada *wavelet* [41], [42] e diferenciação numérica [43] podem ser consideradas.

1.9 Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição

O foco deste trabalho é a localização de faltas em linhas de transmissão. Por fins didáticos, esta seção faz um breve apanhado sobre a localização de faltas em sistemas de distribuição com o objetivo de evidenciar algumas diferenças existentes entre esses dois níveis.

A localização de faltas em LTs é a que tem recebido o maior esforço de pesquisa até os dias de hoje. Tal fato deve-se às grandes dimensões físicas das LTs, que inviabilizam uma simples inspeção visual, bem como porque uma falta em uma LT causa um impacto bem maior no sistema elétrico como um todo. Entretanto, a já mencionada tendência mundial de desregulamentação dos setores de energia elétrica também tem elevado a importância da localização rápida de faltas em sistemas de subtransmissão e distribuição. Em ambientes desregulamentados, as concessionárias de energia competem entre si para manter consumidores, como também para atrair novos clientes. Além disso, muitos países já criaram legislações que regulamentam a QE fornecida pelas concessionárias. Desse modo, os usuários de

energia elétrica passam a ter instrumentos legais para exigir um nível razoável de confiabilidade e qualidade do serviço prestado. Dentre vários aspectos, essas normas tratam do tempo que os consumidores ficam sem energia elétrica, situação comumente causada por faltas no nível de distribuição, como mencionado na Seção 1.3. Para diminuir o tempo de uma interrupção, podem-se utilizar dispositivos de monitoração nas redes elétricas de distribuição que detectam e informam condições anormais de operação. Essa informação pode ser usada para localizar automaticamente faltas, isolar o segmento faltoso e reconfigurar a rede [44]. Entretanto, os sistemas de distribuição também podem ser beneficiados pelo uso de algoritmos de localização de faltas especialmente desenvolvidos para atender as suas peculiaridades. As referências [45], [46], [47] e [48] são bons exemplos de trabalhos nessa área.

1.10 Divisão do Trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta possíveis modelagens de uma LT, cuja escolha deve ser feita em função principalmente do comprimento da linha. O Capítulo 3 apresenta ferramentas matemáticas úteis na análise de LTs sob condição de falta, que são comumente utilizadas pelos algoritmos de localização de faltas. O Capítulo 4 apresenta uma revisão bibliográfica das principais técnicas de localização de faltas em LTs propostas na literatura. O Capítulo 5 descreve em detalhes o método de localização de faltas em LTs proposto neste trabalho. O Capítulo 6 apresenta testes de avaliação do método proposto. Para isso, são simuladas faltas em LTs utilizando o Alternative Transients Program (ATP) [49]. Com os dados obtidos, o algoritmo proposto é utilizado para estimar as localizações das faltas em diversas situações, como faltas localizadas em diferentes pontos da LT e com diferentes valores de resistência. O capítulo em questão também apresenta testes de análise de sensibilidade do algoritmo desenvolvido a erros de sincronismo, erros nos fasores e erros nos parâmetros da LT. Além disso, ele mostra os resultados de testes realizados a partir de dados de faltas reais, que permitem analisar o desempenho do método proposto em situações práticas. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões desta tese bem como sugestões para trabalhos futuros.

Além destes capítulos, este trabalho contém três apêndices. O Apêndice A aborda de forma mais detalhada a decomposição em componentes simétricos e a transformação de Clarke. O Apêndice B trata da definição e ligação dos circuitos de seqüência do modelo de sistema de potência estudado neste trabalho, formado por uma LT e por fontes de tensão conectadas nos dois terminais dessa linha (equivalentes Thévenin). Por fim, o Apêndice C apresenta as deduções das expressões para o cálculo da impedância aparente vista por um terminal da LT para cada um dos possíveis tipos de falta (considerando falta sólida).

Capítulo 2

Modelagem Matemática de Linhas de Transmissão

Este capítulo trata de um tema fundamental para qualquer método de localização de faltas: a modelagem matemática utilizada para caracterizar o comportamento de uma LT. Primeiramente, a Seção 2.1 apresenta a notação adotada para o modelo de sistema de potência trifásico objeto de estudo deste trabalho. A Seção 2.2 trata da definição de uma LT como curta, média ou longa, classificação usada na escolha da modelagem matemática mais apropriada para uma determinada LT, como ilustra a Seção 2.3. A Seção 2.4 mostra como usar os modelos monofásicos descritos na Seção 2.3 na modelagem matemática de LTs trifásicas. Por fim, a Seção 2.5 apresenta as conclusões deste capítulo.

2.1 Notação Adotada

O diagrama unifilar ilustrado na Figura 2.1 apresenta a notação adotada para o modelo de sistema de potência trifásico estudado neste trabalho, cujo principal elemento é a LT de comprimento ℓ que interliga o terminal local S (de *sending end*) ao terminal remoto R (de *receiving end*). Em uma possível condição de falta, considera-se que essa linha sofre uma falta de resistência R_F , de qualquer tipo, no ponto F, que está localizado a uma distância d do terminal S e, conseqüentemente, a uma distância $\ell - d$ do terminal R. Outro parâmetro importante é a distância \bar{d} , que representa a distância do ponto F em relação ao terminal S normalizada pelo comprimento da linha. Assim, define-se

$$\bar{d} = \frac{d}{\ell}. \quad (2.1)$$

Além da linha SR, o modelo de sistema de potência representado na Figura 2.1 possui as fontes de tensão E_S e E_R cujas impedâncias série são Z_S e Z_R , respectivamente. Tais componentes representam os equivalentes Thévenin vistos pelos respectivos terminais da LT.

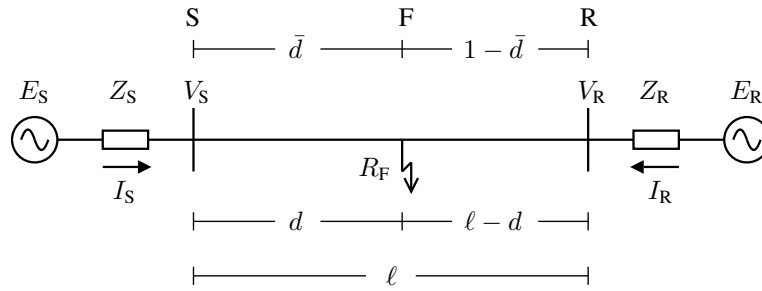


Figura 2.1: Notação adotada para o modelo de sistema de potência trifásico estudado.

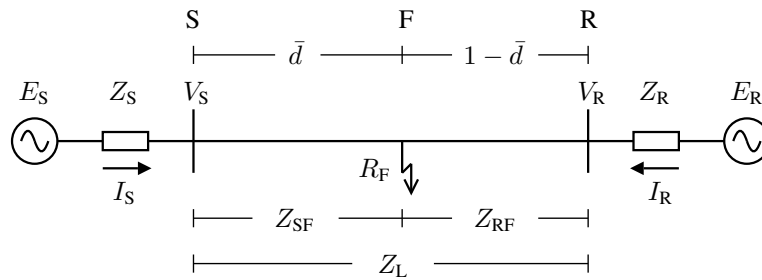


Figura 2.2: Notação adotada para as impedâncias série de uma linha de transmissão em falta.

Os fasores de tensão e corrente medidos no terminal local da linha são representados, respectivamente, por V_S e I_S ; de maneira análoga, os fasores medidos no terminal remoto são designados V_R e I_R .

Neste trabalho, a LT é sempre tratada como homogênea, o que significa que os seus parâmetros elétricos por unidade de comprimento são constantes: resistência série R_u , indutância série L_u e capacitância em derivação C_u . Assim como na maioria dos trabalhos propostos na literatura, a condutância em derivação G_u da linha é aqui desconsiderada, uma vez que o seu efeito é desprezável perante ao efeito da capacitância em derivação da LT e também por não existir uma modelagem confiável desse parâmetro [34]. Desse modo, a impedância série da LT é definida como

$$Z_u = R_u + j\omega L_u \quad (2.2)$$

e a sua admitância em derivação é dada por

$$Y_u = j\omega C_u \quad (2.3)$$

ambas por unidade de comprimento.

A Figura 2.2 apresenta a notação adotada para algumas impedâncias importantes da LT, utilizadas principalmente pelos métodos de localização de faltas baseados em fasores de

um terminal (ver Capítulo 4). Como a linha é homogênea, essas impedâncias são proporcionais aos comprimentos dos respectivos trechos. Assim, a impedância série total da LT é dada por

$$Z_L = \ell Z_u. \quad (2.4)$$

A impedância série do trecho da linha localizado entre o terminal S e o ponto de falta F é uma parcela dessa impedância total dada por

$$Z_{SF} = \bar{d} Z_L. \quad (2.5)$$

De maneira análoga, a impedância série do trecho da linha entre o terminal R e o ponto de falta F é

$$Z_{RF} = (1 - \bar{d}) Z_L. \quad (2.6)$$

Quando necessário, são utilizados os índices 1, 2 e 0, respectivamente, para diferenciar fasores ou parâmetros (da linha e das fontes E_S e E_R) das Figuras 2.1 e 2.2 de seqüências positiva, negativa e zero. Por exemplo, as impedâncias Z_L (Figura 2.2) de seqüências positiva e zero são representadas por Z_{L1} e Z_{L0} , respectivamente; os componentes de seqüência do fasor V_S são representados por V_{S1} , V_{S2} e V_{S0} . Muitas vezes é interessante informar em expressões matemáticas a seqüência ou modo utilizado através de uma variável. Para tal, utiliza-se o índice m . Por exemplo, no caso do fasor V_S , os seus componentes de seqüência ou modais podem ser representados por V_{Sm} , onde m é igual a 0, 1 ou 2.

Para avaliar o desempenho de um método de localização de faltas, define-se o erro de localização de falta, aqui designado por ϵ . Considerando que a estimativa de localização de falta fornecida por um algoritmo de localização seja representada por \hat{d} , o erro de localização de falta dessa estimativa é definido por

$$\epsilon = \frac{\hat{d} - d}{\ell} \times 100. \quad (2.7)$$

Note que (2.7) fornece um erro percentual em relação ao comprimento ℓ da LT, e não em relação ao valor verdadeiro da distância d . Tal estratégia é adotada para que um erro de localização de 1 km, por exemplo, resulte em um mesmo valor de ϵ independentemente se a falta estiver localizada no início, no meio ou no final da LT. Para o caso de distâncias normalizadas, (2.7) pode ser rescrita como

$$\epsilon = (\bar{\hat{d}} - \bar{d}) \times 100 \quad (2.8)$$

onde a variável $\bar{\hat{d}}$ representa a estimativa de localização de falta normalizada pelo comprimento ℓ da LT.

Tabela 2.1: Valores típicos de tensão adotados nos níveis de distribuição, subtransmissão e transmissão de sistemas de potência

Tensão (kV)	Classificação	Nível do sistema
0,220/0,127	Baixa tensão	Distribuição secundária
0,380/0,220	Baixa tensão	Distribuição secundária
13,8	Média tensão	Distribuição primária
34,5	Média tensão	Distribuição primária e subtransmissão
69	Alta tensão	Subtransmissão
138	Alta tensão	Subtransmissão e transmissão
230	Extra alta tensão	Transmissão
345	Extra alta tensão	Transmissão
440	Extra alta tensão	Transmissão
500	Extra alta tensão	Transmissão
765	Extra alta tensão	Transmissão

2.2 Linhas de Transmissão Curtas, Médias e Longas

Como visto na seção anterior, uma LT pode ser caracterizada através de quatro parâmetros básicos:

- resistência série e indutância série;
- condutância em derivação e capacitância em derivação.

Tais parâmetros, de seqüências positiva, negativa e zero, dependem da geometria, do material e do comprimento da LT¹. Além disso, as características de uma LT são variáveis de acordo com o valor da sua tensão de transmissão, que é definido na etapa de projeto em função da potência a ser transmitida e do comprimento da linha de modo a minimizar o custo total de transmissão de energia elétrica [11]. A Tabela 2.1 apresenta valores típicos de tensão adotados na transmissão de energia elétrica, bem como os valores comumente utilizados nos níveis de subtransmissão e distribuição. No Brasil, os sistemas de transmissão que operam em extra alta tensão (EAT) formam a Rede Básica de transmissão de energia elétrica administrada pelo ONS.

Como este trabalho lida apenas com LTs homogêneas, os seus parâmetros série e em derivação podem ser representados através de valores por unidade de comprimento (R_u , L_u , G_u e C_u). Como explicado na Seção 2.1, a condutância em derivação G_u da LT é geralmente desconsiderada na prática. As Tabelas 2.2 e 2.3 apresentam valores típicos dos parâmetros

¹O estudo detalhado desse assunto foge ao escopo deste trabalho e pode ser encontrado em diversas publicações, como em [11], [13], [14], [50] e [51].

Tabela 2.2: Valores típicos dos parâmetros de seqüência positiva das linhas de transmissão da Eletrosul

Tensão (kV)	R_{u1} (m Ω /km)	L_{u1} (mH/km)	C_{u1} (nF/km)
138	115,674	1,226	9,54
230	91,27	1,376	8,47
500	22,1	0,852	13,46

Tabela 2.3: Valores típicos dos parâmetros de seqüência zero de linhas das transmissão da Eletrosul

Tensão (kV)	R_{u0} (m Ω /km)	L_{u0} (mH/km)	C_{u0} (nF/km)
138	416,38	4,491	5,50
230	440,16	4,153	6,10
500	377,70	3,777	8,58

R_u , L_u e C_u de seqüências positiva e zero, respectivamente, de LTs da Eletrosul² de três níveis diferentes de tensão de transmissão [11]. Pelo fato de ser um dispositivo estático, os parâmetros de seqüência negativa de uma LT são iguais aos de seqüência positiva (ver Apêndice B).

Outro aspecto importante de uma LT que varia de acordo com o nível de tensão de transmissão é a sua razão X/R , onde X é a reatância indutiva total da linha e R é a resistência total da linha, ambas de seqüência positiva. Através dos valores de L_{u1} e R_{u1} descritos na Tabela 2.2 e assumindo operação em 60 Hz, podem-se definir os valores típicos da razão X/R das LTs da Eletrosul. A Tabela 2.4 apresenta tais valores, de onde se verifica que essa razão é crescente com o nível de tensão de transmissão da linha. A forma mais comum de reduzir o valor da razão X/R em LTs de 500 e 765 kV é utilizar uma etapa de compensação série nas fases da linha, procedimento que pode prejudicar o desempenho de um método de localização de faltas baseado em fasores (ver Seção 4.4.6).

É importante definir uma LT como curta, média ou longa para que se possa decidir qual modelo matemático representa de forma confiável o seu comportamento. Tal classificação também é utilizada na etapa de especificação do esquema de proteção da LT. A possibilidade mais simples é classificar uma linha como curta, média ou longa levando-se em conta apenas o seu comprimento ℓ , como mostra a Tabela 2.5 [14]. Entretanto, uma classificação mais elaborada deve considerar também outros fatores, tais como o nível de tensão de transmissão da linha e as impedâncias das fontes conectadas nos seus terminais (Z_S e Z_R , ver

²Subsidiária da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás vinculada ao Ministério de Minas e Energia. Trata-se de uma sociedade anônima de capital fechado criada em 23 de dezembro de 1968 que atua no segmento de transmissão de energia elétrica em alta e extra alta tensão. O seu sistema de transmissão está localizado nos estados da região Sul do Brasil e também no Mato Grosso do Sul.

Tabela 2.4: Valores típicos da razão X/R das linhas de transmissão da Eletrosul

Tensão (kV)	Razão X/R
138	3,99
230	5,68
500	14,5

Tabela 2.5: Classificação de uma linha de transmissão de acordo com o seu comprimento

Linha de transmissão	Comprimento
Curta	$\ell < 80$ km
Média	$80 \leq \ell \leq 240$ km
Longa	$\ell > 240$ km

Figura 2.1). Uma possível classificação desse tipo é apresentada na Tabela 2.6, que define uma linha como curta, média ou longa de acordo com o parâmetro denominado *source-to-line impedance ratio* (SIR), dado por

$$\text{SIR} = \frac{Z_{S1}}{Z_{L1}}. \quad (2.9)$$

Como o valor de SIR é fortemente influenciado pelo nível de tensão de transmissão da linha [52], uma classificação baseada nesse parâmetro incorpora tanto o nível de tensão da linha quanto a impedância da fonte conectada ao terminal local na classificação de uma LT como curta, média ou longa.

2.3 Modelos Matemáticos de Linhas de Transmissão

No caso de uma LT curta, o efeito da capacitância em derivação pode ser desprezado³. Sendo assim, LTs curtas podem ser modeladas apenas pelos seus parâmetros série, como mostra a Figura 2.3. A vantagem desse modelo é a sua simplicidade, uma vez que a corrente I_S é igual a $-I_R$. Ele é utilizado por alguns métodos de localização de faltas baseados em fasores (ver Capítulo 4).

No caso de LTs médias, o efeito da capacitância em derivação da LT torna-se relevante uma vez que, devido ao maior comprimento ℓ , a linha apresenta uma capacitância em derivação total de valor considerável. Sendo assim, torna-se necessária a inclusão desse parâmetro na modelagem utilizada para representar a LT. Para evidenciar tal fato, vale destacar que a magnitude da corrente na capacitância em derivação de linhas de maior comprimento

³Intuitivamente é possível perceber que quanto mais longa for uma LT, maiores serão os efeitos capacitivos entre os seus condutores e também entre cada condutor e a terra.

Tabela 2.6: Classificação de uma linha de transmissão de acordo com o parâmetro SIR

Linha de transmissão	Parâmetro SIR
Curta	$SIR \geq 4$
Média	$0,5 < SIR < 4$
Longa	$SIR \leq 0,5$

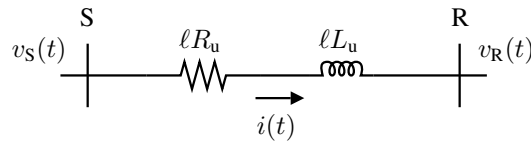


Figura 2.3: Modelo a parâmetros concentrados de uma linha de transmissão curta, formado apenas pelos parâmetros série da linha.

pode ser comparável à magnitude da corrente de falta, especialmente nos casos em que a falta apresenta uma alta resistência [53] ($R_F = 100 \Omega$, por exemplo). Além disso, é possível verificar através das Tabelas 2.2 e 2.3 que a capacitância por unidade de comprimento de uma linha tende a crescer com o nível de tensão de transmissão. Para representar o efeito da capacitância em derivação de uma LT, pode-se utilizar tanto o modelo π quanto o modelo T, que são mostrados na Figura 2.4. Note que em ambos os circuitos a condutância em derivação da LT está sendo desconsiderada.

No caso de uma LT longa, os três modelos a parâmetros concentrados apresentados anteriormente não representam o comportamento da linha de forma adequada [4], [14]. Para entender o porquê dessa limitação, deve-se considerar o comprimento de onda λ da onda eletromagnética transmitida pela LT. Para o caso de uma LT aérea, monofásica e sem perdas, a velocidade de propagação da onda eletromagnética é dada por

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{L_u C_u}}. \quad (2.10)$$

Pode-se mostrar que tal expressão resulta em

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = c \quad (2.11)$$

onde

$$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m} \quad (2.12)$$

é a constante de permeabilidade,

$$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2.13)$$

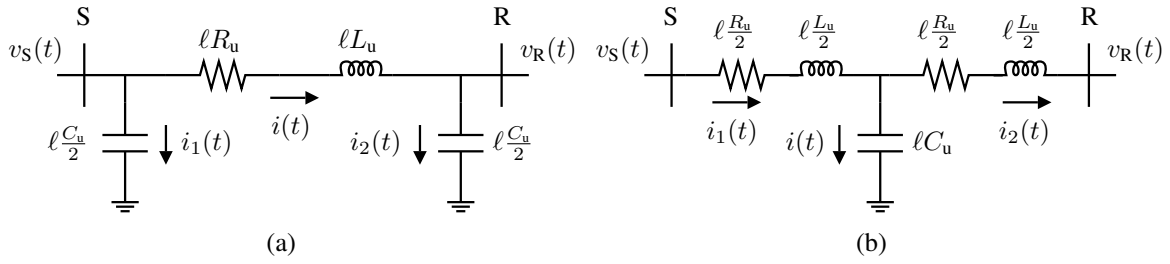


Figura 2.4: Modelos a parâmetros concentrados de uma linha de transmissão média, formados pelos parâmetros série e em derivação da linha. (a) Modelo π . (b) Modelo T.

é a constante de permissividade (ou constante dielétrica) do espaço livre [14], [50] e c^4 é a velocidade da luz no vácuo. Como a onda eletromagnética se propaga na velocidade da luz, o seu comprimento de onda é dado por

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.14)$$

onde f representa a frequência de operação do sistema de potência em hertz. Para o caso brasileiro, em que $f = 60$ Hz, e considerando $c = 3 \times 10^8$ m/s, o comprimento de onda é

$$\lambda = \frac{c}{60} = 5000 \text{ km.}$$

Por exemplo, para uma linha de 240 km (menor LT definida como longa na Tabela 2.5), o comprimento da linha corresponde a aproximadamente 5% de λ . Portanto, o comprimento de uma LT longa é comparável ao valor do comprimento de onda λ , apesar da baixa frequência da onda eletromagnética transmitida pela LT. Para fins de comparação, tal situação é equivalente a um pequeno circuito montado em uma placa de circuito impresso com 10 cm de comprimento operando em uma frequência de 150 MHz. Nesse tipo de situação, um modelo a parâmetros concentrados não representa adequadamente o comportamento da linha, pois as leis de Kirchhoff deixam de ser válidas. Nesse caso, o procedimento mais adequado consiste em adotar a modelagem baseada em parâmetros uniformemente distribuídos ao longo da LT mostrada a seguir.

Considere a LT monofásica mostrada na Figura 2.5, onde x representa a distância de um ponto qualquer dessa linha em relação ao terminal local S. A variação da tensão e da corrente na linha em função de x podem ser calculadas, respectivamente, por

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -R_u i(x,t) - L_u \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.15)$$

⁴Como curiosidade, o símbolo c normalmente adotado para representar a velocidade da luz origina-se do termo “celeritas”, que em latim significa rapidez.

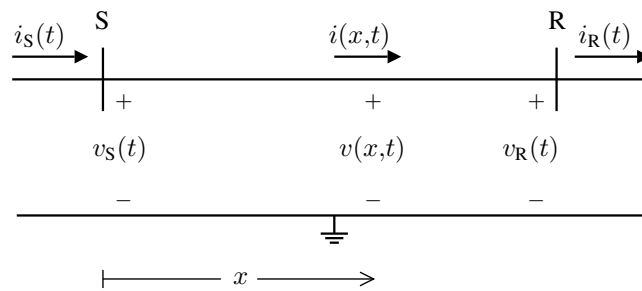


Figura 2.5: Linha de transmissão monofásica.

e

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -G_u v(x,t) - C_u \frac{\partial v(x,t)}{\partial t}. \quad (2.16)$$

Para operação em regime permanente senoidal, que é o caso mais importante para este trabalho, pode-se deduzir as seguintes expressões [4], [14]:

$$V(x) = V_S \cosh(\gamma x) - I_S Z_c \sinh(\gamma x) \quad (2.17)$$

e

$$I(x) = I_S \cosh(\gamma x) - \frac{V_S}{Z_c} \sinh(\gamma x) \quad (2.18)$$

respectivamente, onde

$$\gamma = \sqrt{Z_u Y_u} \quad (2.19)$$

é a constante de propagação e

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_u}{Y_u}} \quad (2.20)$$

é a impedância característica (ou impedância de surto) da LT, com Z_u e Y_u dadas por (2.2) e (2.3), respectivamente. Assim, se os fasores de tensão V_S e de corrente I_S forem conhecidos, é possível determinar os fasores de tensão e de corrente em qualquer ponto localizado a uma distância x do terminal local da linha.

É prática comum decompor a constante de propagação γ definida por (2.19) em partes real e imaginária. Assim,

$$\gamma = \text{Re}(\gamma) + j \text{Im}(\gamma). \quad (2.21)$$

O termo $\text{Re}(\gamma)$ representa a constante de atenuação, expressa em népers por unidade de comprimento; a parte $\text{Im}(\gamma)$ é a constante de defasagem, expressa em radianos por unidade de comprimento.

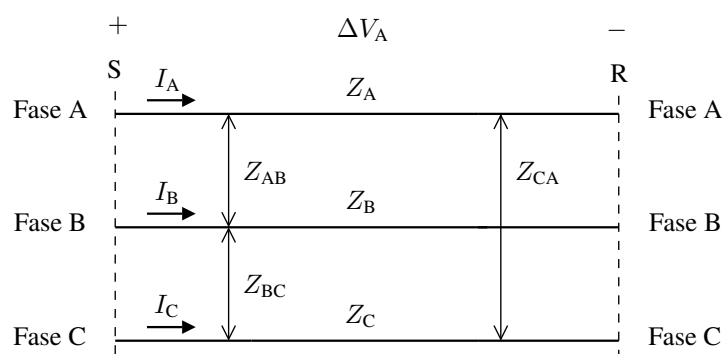


Figura 2.6: Linha de transmissão trifásica não-transposta.

2.4 Linhas de Transmissão Trifásicas

As modelagens matemáticas apresentadas na seção anterior são válidas para LTs monofásicas. Esta seção trata do caso de linhas trifásicas, que são as que realmente interessam a este trabalho. Para isso, considere a Figura 2.6, que apresenta uma LT trifásica com impedâncias próprias Z_A , Z_B e Z_C e mútuas Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA} . A queda de tensão ao longo da fase A dessa LT é dada por

$$\Delta V_A = Z_A I_A + Z_{AB} I_B + Z_{CA} I_C. \quad (2.22)$$

As expressões das quedas de tensão ao longo das outras fases são análogas a (2.22), apenas substituindo nessa expressão as devidas correntes de fase e impedâncias próprias e mútuas. O fato de (2.22) ser função das correntes I_A , I_B e I_C mostra que as fases de uma linha trifásica são magneticamente acopladas devido à existência das impedâncias mútuas, o que explica por que uma fase também é perturbada quando da ocorrência de defeitos em outras fases. Por esse motivo, as modelagens vistas até aqui não podem ser utilizadas diretamente em uma LT trifásica.

Como as fases de uma LT são constituídas por condutores de mesmas características e comprimentos praticamente idênticos, as suas impedâncias próprias podem ser consideradas todas iguais. Neste trabalho, adota-se

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z_p. \quad (2.23)$$

Além disso, as LTs geralmente apresentam a chamada transposição de fases, procedimento que faz com que todas as fases ocupem cada uma das possíveis posições espaciais em 1/3 do comprimento da LT, como mostra a Figura 2.7. Nesse caso, as impedâncias mútuas entre as fases da linha podem ser consideradas todas iguais. Neste trabalho, considera-se que para LTs transpostas,

$$Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z_m. \quad (2.24)$$

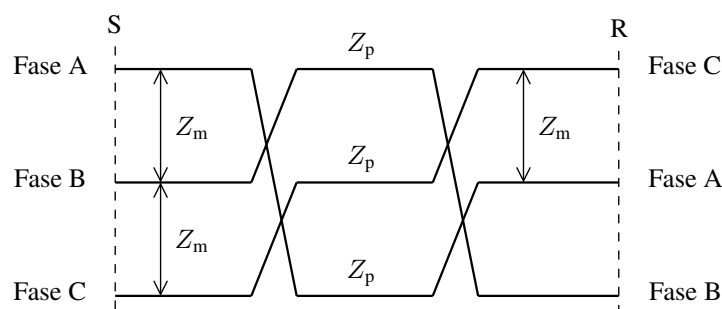


Figura 2.7: Linha de transmissão transposta.

De acordo com [51], além de reduzir eventuais desbalanceamentos eletromagnéticos e eletrostáticos entre as fases da linha, que podem levá-la a operar de forma desequilibrada, a transposição de fases também auxilia a:

- reduzir o tempo de extinção do arco de uma falta;
- diminuir as perdas na transmissão;
- reduzir a interferência eletromagnética causada em linhas de telecomunicações próximas à LT.

Substituindo (2.23) e (2.24) em (2.22), determina-se que a queda de tensão ao longo da fase A de uma LT transposta é dada por

$$\Delta V_A = Z_p I_A + Z_m (I_B + I_C). \quad (2.25)$$

Se a linha transposta estiver operando de forma equilibrada, tem-se $I_A + I_B + I_C = 0$ ou

$$I_B + I_C = -I_A. \quad (2.26)$$

Substituindo esse resultado em (2.25) e colocando I_A em evidência, determina-se que

$$\Delta V_A = (Z_p - Z_m) I_A. \quad (2.27)$$

Tal resultado mostra que a análise de uma LT transposta equilibrada pode ser feita através de um circuito equivalente monofásico utilizando uma das modelagens apresentadas neste capítulo, uma vez que a variação de tensão ao longo de uma fase depende apenas da corrente da própria fase (fases desacopladas). Como nesse caso ΔV_A e I_A são formados somente por componentes de seqüência positiva (sistema em equilíbrio), pode-se concluir que o termo $Z_p - Z_m$ em (2.27) representa a impedância de seqüência positiva da LT. Portanto,

$$Z_p - Z_m = Z_{L1}. \quad (2.28)$$

Logo, tal circuito equivalente monofásico representa o circuito de seqüência positiva do sistema (ver Apêndice B).

Entretanto, a menos da ocorrência de uma falta trifásica, LTs faltosas não operam em equilíbrio. Sendo assim, mesmo linhas transpostas apresentam acoplamentos magnéticos quando da ocorrência de um falta desequilibrada. Nesse caso, a análise do sistema deve novamente ser feita através das impedâncias próprias e mútuas da linha. A saída para evitar tal dificuldade é utilizar uma transformação matemática que permita trabalhar com circuitos monofásicos desacoplados, tal como a decomposição em componentes simétricos (ver Seção 3.2) ou ainda uma transformação modal (ver Seção 3.3). Esse procedimento permite utilizar as modelagens monofásicas desenvolvidas na Seção 2.3 na análise de uma LT trifásica desequilibrada.

2.5 Conclusões

Este capítulo apresentou um estudo acerca das possíveis modelagens matemáticas de uma LT utilizadas pelos métodos de localização de faltas que serão apresentados no Capítulo 4. De acordo com o seu comprimento, uma LT pode ser analisada a partir de uma modelagem a parâmetros concentrados, utilizando apenas parâmetros série (LT curta) ou parâmetros série e em derivação (LT média). Para LTs longas, o mais adequado é utilizar uma modelagem a parâmetros distribuídos. Outro aspecto importante discutido neste capítulo é a transposição de fases, estratégia comumente empregada em LTs trifásicas. Dentre outros aspectos, a transposição de fases facilita a análise matemática de LTs faltosas.

Capítulo 3

Ferramentas Matemáticas Utilizadas Por Métodos de Localização de Faltas

O objetivo deste capítulo é descrever algumas ferramentas matemáticas comumente usadas pelos métodos de localização de faltas propostos na literatura. A Seção 3.1 define a notação adotada pelas transformações matemáticas utilizadas para decompor as grandezas de um sistema trifásico desequilibrado em grandezas monofásicas independentes. A Seção 3.2 trata da decomposição em componentes simétricos [4], [14], [34] e a Seção 3.3 apresenta o conceito de transformação modal [54], comumente usadas pelos algoritmos apresentados no Capítulo 4 deste trabalho. A Seção 3.4 descreve o princípio da superposição aplicado na análise de LTs em falta, modelagem utilizada principalmente pelos métodos de localização de faltas baseados em fasores de um único terminal. Por fim, a Seção 3.5 apresenta as conclusões deste capítulo.

3.1 Decomposição de Sistemas Trifásicos

Como mostrado na Seção 2.4, as N fases de uma LT são magneticamente acopladas. Para que se possam utilizar os modelos monofásicos apresentados na Seção 2.3, deve-se aplicar previamente uma transformação matemática que desacople as grandezas de um sistema trifásico desequilibrado. Feito isso, é possível tratar um sistema de potência com N fases desequilibradas como N circuitos monofásicos independentes (sem acoplamento magnético). No caso de sistemas trifásicos, uma transformação desse tipo apresenta a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

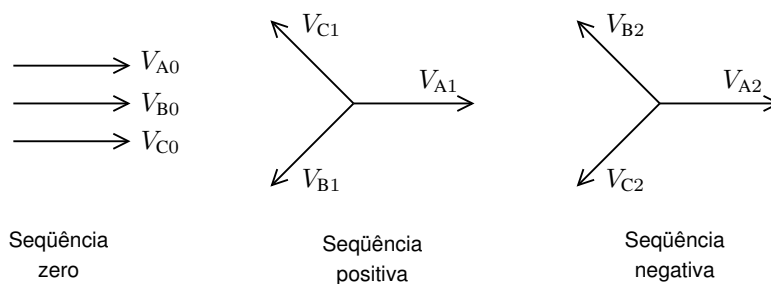


Figura 3.1: Componentes simétricos de uma grandeza trifásica $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]$.

onde $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]^T$ representa uma tensão (ou corrente) trifásica; \mathbf{T} é a matriz de transformação; $\mathbf{V}_{md} = [V_0, V_1, V_2]^T$ representa os componentes de seqüência ou componentes modais dessa tensão (ou corrente) trifásica. De forma inversa, pode-se escrever

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

3.2 Decomposição em Componentes Simétricos

A decomposição em componentes simétricos é uma transformação matemática baseada no trabalho de C. L. Fortescue apresentado em 1918 [55]. O teorema de Fortescue demonstra que um sistema composto por N fasores desequilibrados pode ser decomposto em N sistemas formados por N fasores equilibrados, denominados componentes simétricos dos fasores originais. A limitação dessa transformação é que ela só gera modos desacoplados para o caso de LTs transpostas (ver Apêndice A).

No caso de um sistema trifásico desequilibrado, a decomposição em componentes simétricos resulta nos três conjuntos de fasores equilibrados mostrados na Figura 3.1, que são assim denominados:

- componentes de seqüência zero (índice 0): três fasores de igual magnitude em fase;
- componentes de seqüência positiva (índice 1): três fasores equilibrados e com mesma seqüência de fases dos originais;
- componentes de seqüência negativa (índice 2): três fasores equilibrados e com seqüência de fases oposta à dos originais.

Assim, um conjunto de três fasores V_A , V_B e V_C é decomposto em

$$\begin{cases} V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \\ V_B = V_{B0} + V_{B1} + V_{B2} \\ V_C = V_{C0} + V_{C1} + V_{C2} \end{cases}. \quad (3.3)$$

Como as grandezas de uma mesma seqüência são, por definição, equilibradas, é forma padrão representar os componentes simétricos da fase B (V_{B0} , V_{B1} e V_{B2}) e da fase C (V_{C0} , V_{C1} e V_{C2}) em função dos componentes simétricos da fase A (V_{A0} , V_{A1} e V_{A2}). Para isso, define-se o operador de rotação complexo

$$a = 1e^{j120^\circ}. \quad (3.4)$$

Assim, as relações definidas em (3.3) podem ser representadas através da seguinte expressão matricial:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

onde V_0 , V_1 e V_2 representam os componentes de seqüência da fase A (fasores V_{A0} , V_{A1} e V_{A2} na Figura 3.1). Comparando (3.5) com (3.1), pode-se definir que a matriz de transformação nesse caso é dada por

$$\mathbf{T}_S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

De forma inversa, os componentes simétricos da fase A podem ser escritos em função das grandezas de fase através de

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

No caso de LTs transpostas, pode-se utilizar a decomposição em componentes simétricos e com isso trabalhar com os circuitos de seqüência (fase A) dos geradores e da LT conectados de forma adequada de acordo com o tipo de falta ocorrido na LT (ver Apêndice B). Devido à condição de equilíbrio, pode-se considerar para efeito de análise apenas um desses circuitos monofásicos. Tal propriedade é explorada por vários algoritmos de localização de faltas [29], [32], [33].

3.3 Transformação Modal

Uma transformação modal [54], [56], [57] é utilizada para decompor as grandezas de um sistema de potência trifásico em três modos magneticamente desacoplados:

- um modo terra, correspondente ao índice 0 em (3.1) e (3.2);
- dois modos aéreos, de índices 1 e 2 em (3.1) e (3.2).

Existem diversas matrizes de transformação modal apresentadas na literatura. As mais comumente usadas são as transformações de Clarke¹ [58], que recebe maior atenção nesta pesquisa, de Wedepohl [59] e de Karrenbauer [60].

Como mostrado anteriormente, a decomposição em componentes simétricos separa uma grandeza trifásica desequilibrada em três conjuntos trifásicos de fasores equilibrados. Já a transformação de Clarke separa essa mesma grandeza em componentes decompostos sobre dois eixos em quadratura, modos 1 (ou α) e 2 (ou β), mais um componente de modo 0 (equivalente ao componente simétrico de seqüência zero, ver Apêndice A). Para isso, a matriz de transformação \mathbf{T} usada em (3.1) é definida como

$$\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

A matriz de transformação inversa usada em (3.2) é

$$\mathbf{T}_C^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Assim como a decomposição em componentes simétricos, a transformação de Clarke resulta em três modos exatos (perfeitamente desacoplados) caso a LT do sistema mostrado na Figura 2.1 seja transposta. Além disso, essa transformação apresenta uma característica importante. Se a LT não for transposta mas apresentar um plano de simetria vertical (como as linhas ilustradas na Figura 3.2), o que é comumente verificado no nível de transmissão, essa transformação gera um modo exato e dois quase-modos. Na prática, uma aproximação satisfatória é considerar esses quase-modos como modos exatos [61]. Caso a linha não apresente um plano de simetria vertical, situação mais comum no nível de subtransmissão, a transformação de Clarke ainda gera resultados adequados [62]. O Apêndice A apresenta a transformação de Clarke de forma mais detalhada, devido ao fato de essa ferramenta matemática ser bastante empregada em algoritmos de localização de faltas.

No caso da transformação de Wedepohl, a matriz de transformação \mathbf{T} usada em (3.1) é definida como

$$\mathbf{T}_W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

¹Também conhecida como transformação $\alpha\beta 0$.

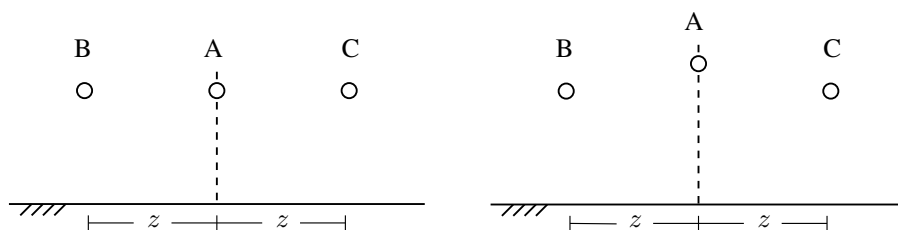


Figura 3.2: Exemplos de linhas de transmissão trifásicas com simetria vertical.

Já para a transformação de Karrenbauer, essa matriz de transformação é

$$\mathbf{T}_K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

As matrizes inversas destas duas transformações modais, usadas em (3.2), são dadas, respectivamente, por

$$\mathbf{T}_W^{-1} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \\ 1/6 & -1/3 & 1/6 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

e

$$\mathbf{T}_K^{-1} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & -1/3 & 0 \\ 1/3 & 0 & -1/3 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

3.4 Princípio da Superposição Aplicado à Análise de Linhas de Transmissão em Falta

O princípio da superposição é uma ferramenta matemática bastante útil na análise do sistema de potência mostrado na Figura 2.1. A sua utilização permite separar a rede sob condição de falta (rede de pós-falta) em duas redes distintas: rede de pré-falta e rede de falta. Com isso, o efeito de uma falta na LT pode ser modelado através das análises dessas duas redes separadamente. Com relação aos métodos de localização de faltas em LTs, o princípio da superposição é utilizado principalmente pelas abordagens baseadas em fasores de um terminal [63]–[66] (ver Seção 4.4).

3.4.1 Modelagem de Uma Falta Através de Fontes de Tensão

Considere o diagrama unifilar dado pela Figura 3.3, que representa uma LT que sofre uma falta trifásica no instante de tempo t_F . A suposição de falta trifásica é comumente adotada na literatura porque uma falta desse tipo resulta em um sistema trifásico que, apesar

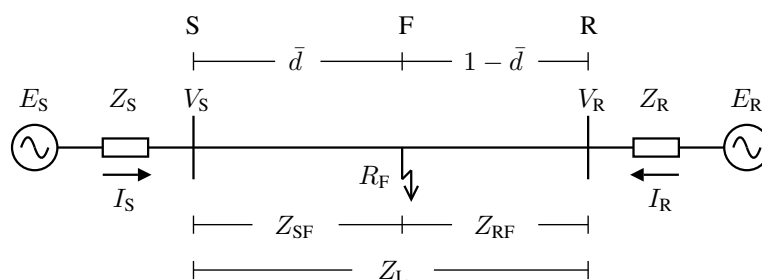


Figura 3.3: Diagrama unifilar de uma linha de transmissão com falta trifásica.

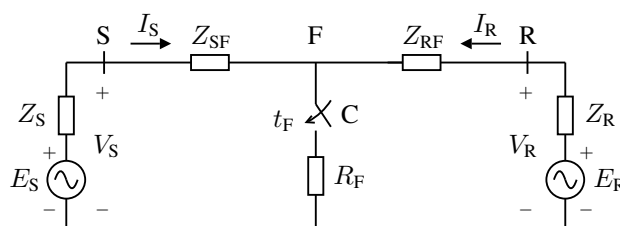


Figura 3.4: Circuito equivalente monofásico de uma linha de transmissão com falta trifásica.

do defeito, opera de forma equilibrada. Como em tal condição os fasores de tensão e corrente são formados unicamente por componentes de seqüência positiva, a análise do sistema é simplificada, pois pode ser feita através de um circuito equivalente monofásico (circuito de seqüência positiva, ver Apêndice B). Para estudar o comportamento dessa LT quando da ocorrência de outros tipos de falta (não-balanceadas) é necessário utilizar previamente uma decomposição em componentes simétricos e associar os circuitos de seqüência de forma adequada, como mostrado no Apêndice B.

A Figura 3.4 apresenta o circuito equivalente monofásico da LT com falta trifásica ilustrada na Figura 3.3, no qual a chave C é utilizada para gerar uma falta de resistência R_F no instante de tempo $t = t_F$. Na realidade, dever-se-ia associar o índice 1 às impedâncias desse circuito equivalente monofásico. Entretanto, tal índice está sendo omitido a fim de simplificar a notação. Para que se possa aplicar o princípio da superposição na análise dessa rede, a falta deve ser modelada através de duas fontes independentes de tensão ou de corrente. Neste trabalho, tal modelagem é feita através de duas fontes de tensão.

A fim de facilitar a aplicação do princípio da superposição na análise do circuito equivalente monofásico, vamos considerar inicialmente o caso de uma falta sólida, o que significa adotar $R_F = 0$. Para $t < t_F$, o circuito da Figura 3.4 está operando na condição de pré-falta e o seu circuito equivalente é o mostrado na Figura 3.5. A análise dessa rede permite definir uma tensão de circuito aberto E_{Th} entre o ponto F e o neutro, que pode ser determinada através das leis de Kirchhoff ou ainda pela análise do fluxo de potência do sistema. Para $t \geq t_F$, o circuito da Figura 3.4 opera na condição de pós-falta. Como a falta é sólida, a tensão no ponto F é obrigatoriamente nula. Assim, a falta ocorrida pode ser

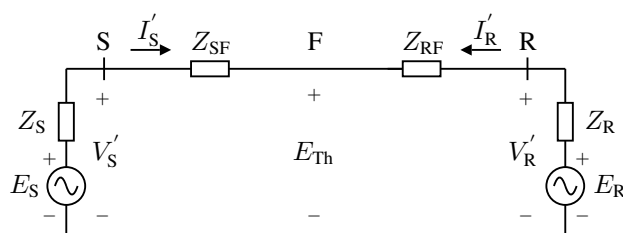


Figura 3.5: Rede de pré-falta, equivalente ao circuito da Figura 3.4 para $t < t_F$. A tensão E_{Th} é definida como a tensão entre o ponto F e o neutro desta rede.

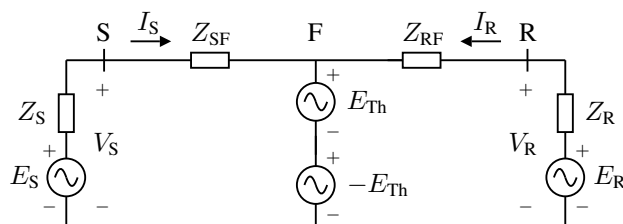


Figura 3.6: Rede de pós-falta, equivalente ao circuito da Figura 3.4 para $t \geq t_F$. A diferença de potencial nula entre o ponto F e o neutro é modelada a partir de duas fontes cujas tensões apresentam magnitude E_{Th} e defasagem de 180° .

modelada através de duas fontes de tensão em série de valores E_{Th} e $-E_{Th}$, como mostra a Figura 3.6.

3.4.2 Aplicação do Princípio da Superposição

Considere a rede de pós-falta mostrada na Figura 3.6, que é alimentada por quatro fontes de tensão independentes. Tratando-se de um sistema linear, o princípio da superposição pode ser aplicado na sua análise. O objetivo neste ponto é determinar a partir desse circuito as três redes mostradas na Figura 3.7. A obtenção da rede de pós-falta da Figura 3.7(a) é direta, pois ela é equivalente à mostrada na Figura 3.6. Para determinar a rede de pré-falta da Figura 3.7(b), mata-se apenas a fonte de tensão de valor $-E_{Th}$ do circuito da Figura 3.6. Pode-se verificar que o circuito resultante [Figura 3.7(b)] é equivalente ao apresentado na Figura 3.5, exceto pela inclusão de uma fonte de tensão de valor E_{Th} entre o ponto F e o neutro. De maneira semelhante ao que ocorre no teorema da substituição [67], como a tensão dessa fonte é igual à tensão de pré-falta no ponto F da rede da Figura 3.5, a sua inclusão não altera o comportamento do circuito uma vez que a corrente I'_F é nula, o que equivale a um circuito aberto. A rede de falta da Figura 3.7(c) é obtida matando todas as fontes de tensão da rede de pós-falta da Figura 3.6 exceto a de valor $-E_{Th}$. Assim, a rede de falta é alimentada exclusivamente pela fonte de tensão de valor $-E_{Th}$.

A vantagem desta modelagem baseada no princípio da superposição é que os fasores de pós-falta [mostrados na Figura 3.7(a)] podem ser vistos como os respectivos fasores de pré-falta [mostrados na Figura 3.7(b)] acrescidos de variações causadas pela ocorrência da

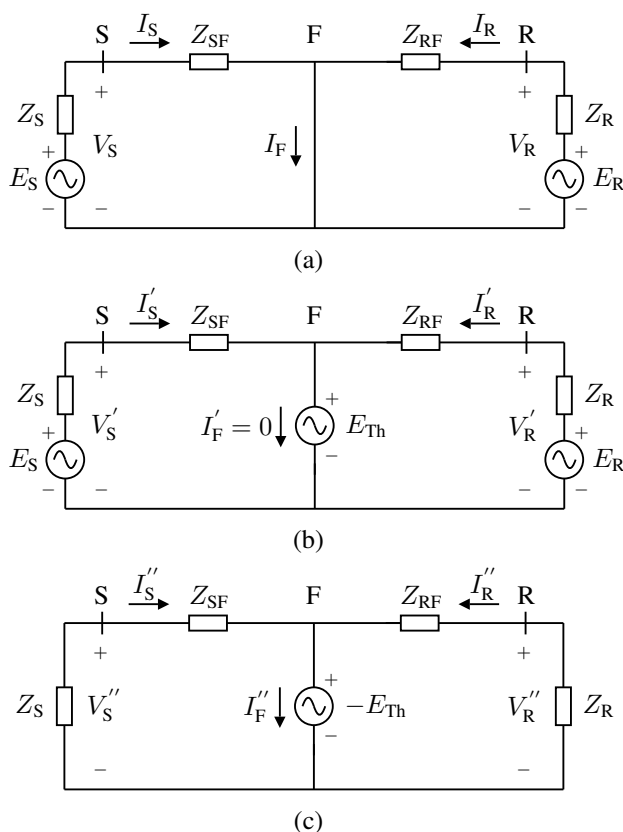


Figura 3.7: Princípio da superposição aplicado em uma linha de transmissão com falta sólida. (a) Rede de pós-falta. (b) Rede de pré-falta. (c) Rede de falta.

falta [fasores da Figura 3.7(c)]. Por exemplo, a tensão de pós-falta no terminal local da LT é dada por

$$V_S = V_S' + V_S'' \quad (3.14)$$

Rearranjando os termos dessa expressão, pode-se escrever

$$V_S'' = \Delta V_S = V_S - V_S' \quad (3.15)$$

de onde se conclui que V_S'' representa uma variação de tensão. Portanto, qualquer fasor da rede de falta é definido pela diferença entre os respectivos fasores de pré-falta e de pós-falta. Como a rede de falta não é real, tal característica pode ser utilizada para determinar os fasores do seu terminal local, uma vez que tanto os fasores de pré-falta quanto os de pós-falta do terminal local podem ser determinados via medição. Tal fato é utilizado para definir os dois importantes parâmetros (fator de carga e fator de distribuição de corrente) apresentados na Seção 3.4.3.

Para o caso mais geral (faltas não-sólidas), a resistência de falta R_F deve ser incluída nos circuitos da Figura 3.7, o que resulta nas redes apresentadas na Figura 3.8. Pode-se estranhar a inclusão de R_F na rede de pré-falta da Figura 3.8(b) devido a dois motivos. Primeiro,

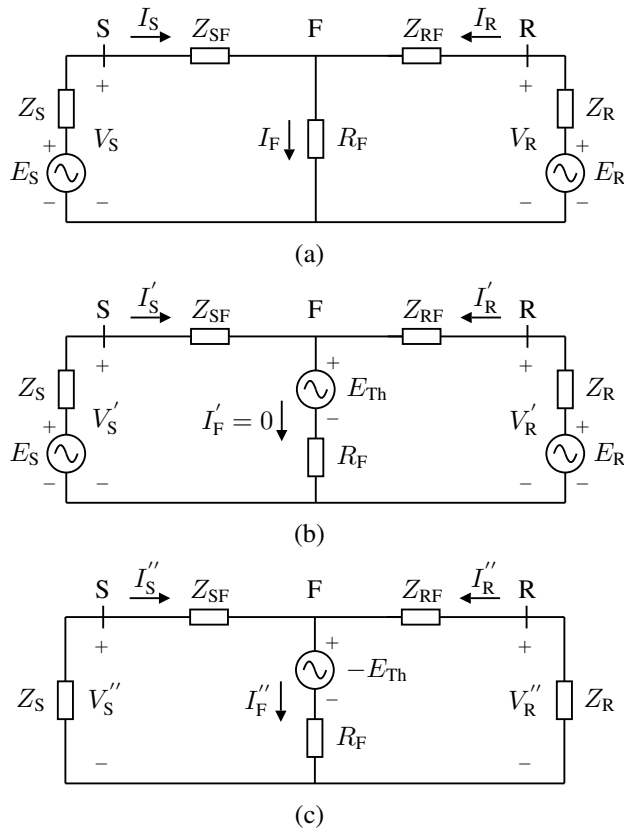


Figura 3.8: Princípio da superposição para uma linha de transmissão com falta de resistência R_F . (a) Rede de pós-falta. (b) Rede de pré-falta. (c) Rede de falta.

o princípio da substituição prevê a substituição de uma tensão conhecida (no caso E_{Th}) por uma fonte de tensão ideal e não por uma fonte de tensão em série com um resistor. Segundo, o resistor R_F não existe na rede de pré-falta, que deve apresentar um circuito aberto entre o ponto F e o neutro, com uma tensão de valor E_{Th} , como mostra a Figura 3.5. Entretanto, se a corrente I'_F na rede da Figura 3.8(b) for realmente nula, essa modelagem é válida. Para verificar se tal condição é verdadeira, pode-se utilizar as leis de Kirchhoff. A tensão E_{th} pode ser calculada a partir do circuito da Figura 3.5, de onde verifica-se que

$$E_{Th} = V'_S - Z_{SF}I'_S. \quad (3.16)$$

Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões na malha esquerda da rede de pré-falta da Figura 3.8(b), determina-se

$$-V'_S + Z_{SF}I'_S + E_{Th} + R_F I'_F = 0. \quad (3.17)$$

Isolando I'_F em (3.17), obtém-se

$$I'_F = \frac{V'_S - Z_{SF}I'_S - E_{Th}}{R_F}. \quad (3.18)$$

Substituindo (3.16) em (3.18), conclui-se que

$$I'_F = 0.$$

Logo, apesar da inclusão do resistor R_F , a rede da Figura 3.8(b)² é equivalente ao circuito de pré-falta mostrado na Figura 3.5.

3.4.3 Fator de Carga e Fator de Distribuição de Corrente

Dois parâmetros advindos da modelagem da rede de pós-falta através do princípio da superposição são comumente usados em métodos de localização baseados em fasores de um terminal. Um deles é o chamado fator de carga do circuito, definido como

$$n_s = \frac{I_S}{\Delta I_S} = |n_s|e^{j\theta} \quad (3.19)$$

lembrando que ΔI_S é a corrente I_S'' do circuito de falta da Figura 3.7(c). Na literatura, a corrente de pré-falta em S (I_S') é geralmente chamada de corrente de carga por ser a corrente entregue à carga conectada no terminal R da LT [pois $I_R' = -I_S'$, ver Figura 3.7(b)]. Nesse caso, I_S' é comumente designada por I_L . Conhecendo os fasores de corrente de pós-falta e de pré-falta no terminal S da linha (I_S e $I_S' = I_L$, obtidos via medição), a variação da corrente verificada no terminal S devido à ocorrência da falta é calculada de maneira análoga a (3.15) através de

$$\Delta I_S = I_S - I_L. \quad (3.20)$$

Feito isso, o fator n_s é determinado através de (3.19).

O outro parâmetro utilizado pelos métodos baseados em fasores de um terminal é o fator de distribuição de corrente, definido por

$$d_s = \frac{\Delta I_S}{I_F} = |d_s|e^{j\beta} \quad (3.21)$$

Neste caso, a corrente I_F não pode ser obtida diretamente por medição. A solução é deduzir a expressão de d_s através da análise das redes da Figura 3.7. Analisando a rede de falta da Figura 3.7(c), pode-se deduzir que

$$\Delta I_S = \frac{E_{Th}}{Z_R + Z_{SF}}. \quad (3.22)$$

A corrente de falta I_F utilizada em (3.21) é a que circula entre o ponto F e o neutro da rede de pós-falta da Figura 3.7(a). Apesar disso, é mais fácil deduzir a sua expressão através das

²A maioria das publicações não inclui o resistor R_F na rede de pré-falta. Optou-se em colocá-lo neste trabalho para que essa rede fique completamente de acordo com o princípio da superposição.

redes de pré-falta e de falta considerando

$$I_F = I'_F + I''_F. \quad (3.23)$$

Pode-se verificar através da rede de pré-falta da Figura 3.7(b) que

$$I'_F = 0. \quad (3.24)$$

Analisando a rede de falta da Figura 3.7(c), conclui-se que

$$I''_F = I''_S + I''_R = \frac{E_{Th}}{Z_{SF} + Z_S} + \frac{E_{Th}}{Z_{RF} + Z_R}. \quad (3.25)$$

Substituindo (3.24) e (3.25) em (3.23), tem-se que a corrente de falta é

$$I_F = I''_F = \frac{E_{Th}}{Z_{SF} + Z_S} + \frac{E_{Th}}{Z_{RF} + Z_R}. \quad (3.26)$$

Substituindo (3.22) e (3.26) em (3.21) e fazendo as devidas manipulações matemáticas, obtém-se o fator de distribuição de corrente dado por

$$d_s = \frac{Z_R + (1 - \bar{d})Z_L}{Z_R + Z_L + Z_S}. \quad (3.27)$$

Através de (3.19) e (3.21) pode-se constatar que os fatores n_s e d_s são grandezas complexas, geralmente expressas na forma polar. Esses dois parâmetros influenciam sobremaneira o desempenho de alguns métodos de localização de faltas em LTs baseados em fasores de um único terminal (ver Seção 4.4.1). As suas fases θ e β são os parâmetros de maior importância, uma vez que a influência das magnitudes $|n_s|$ e $|d_s|$ pode ser bastante reduzida adotando-se somente a parte imaginária das equações que envolvem n_s e/ou d_s . Quanto maiores essas fases, maior o erro da estimativa de localização de falta do algoritmo. Logo, é importante verificar sob quais condições as fases θ e β são nulas ou, pelo menos, próximas de zero.

A fase θ do fator de carga n_s somente é nula se não houver um fluxo de potência na LT. Portanto, esse parâmetro é influenciado pela carga do sistema, daí o seu nome, fator de carga. Entretanto, existe uma situação na qual a fase θ é próxima de zero. Para verificar tal condição, é interessante isolar I_S em (3.22), o que resulta em

$$I_S = I_L + \Delta I_S. \quad (3.28)$$

Se a corrente ΔI_S acrescida pela falta for muito grande, pode-se verificar através de (3.28) que a magnitude de I_S será muito maior do que a da corrente de carga I_L , resultando em ΔI_S praticamente em fase com I_S . Através de (3.19), conclui-se que $\theta \approx 0$ para tal condição.

A expressão (3.27) mostra que o fator de distribuição de corrente d_s é função da impedância da LT (Z_L), das impedâncias das fontes (Z_S e Z_R) e da própria localização da falta (\bar{d}). Em geral, quanto mais forte for a fonte local E_S , mais próximo de zero é o ângulo β [30]. O parâmetro β só é completamente nulo se o sistema mostrado na Figura 3.3 for homogêneo, que é um tipo de sistema de potência em que tanto o ângulo de fase de Z_S quanto o de Z_R são iguais ao ângulo de fase da impedância Z_L . Pode-se constatar que para um sistema homogêneo as fases do numerador e do denominador de (3.27) são iguais, o que torna o fator de distribuição de corrente d_s puramente real ($\beta = 0$).

3.5 Conclusões

Este capítulo apresentou ferramentas matemáticas comumente empregadas pelos métodos de localização de faltas propostos na literatura. Primeiramente, foram discutidas transformações matemáticas utilizadas para decompor um conjunto de fasores de um sistema trifásico desequilibrado em função da ocorrência de uma falta em um conjunto de fasores desacoplados (circuitos monofásicos). Duas dessas transformações foram destacadas: a decomposição em componentes simétricos, adequada para o tratamento de LTs transpostas, e a transformação de Clarke, adequada para a análise tanto de LTs transpostas quanto de LTs não-transpostas que apresentem um eixo de simetria vertical. Outra ferramenta matemática importante discutida neste capítulo foi o princípio da superposição aplicado na análise de LTs faltosas, utilizada principalmente pelos métodos de localização de faltas baseados em fasores de um terminal.

Capítulo 4

Revisão das Técnicas de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão

Este capítulo apresenta uma síntese das principais técnicas de localização de faltas em LTs propostas na literatura. A Seção 4.1 classifica esses métodos de localização de acordo com o tipo de sinal empregado pelos algoritmos. A Seção 4.2 aborda de forma sucinta os métodos de localização de faltas baseados no conhecimento¹ e a Seção 4.3 trata dos métodos de localização baseados em transitórios de alta frequência. A Seção 4.4 discorre a respeito dos métodos de localização de faltas baseados em fasores de frequência fundamental². Como o presente trabalho propõe uma técnica dessa natureza, essa é a classe de algoritmos de localização de faltas que recebe o maior esforço de pesquisa. Por fim, a Seção 4.5 apresenta as conclusões deste capítulo.

4.1 Classificação dos Métodos de Localização de Faltas

De maneira simplificada, pode-se considerar que os sinais de tensão e corrente medidos nos terminais de uma LT sob condição de falta são formados por um componente de frequência fundamental e por sinais transitórios de alta frequência. Sendo assim, as técnicas de localização de faltas em LTs apresentadas na literatura podem ser classificadas em um primeiro momento em dois grupos:

1. métodos de localização de faltas baseados em fasores de frequência fundamental;
2. métodos de localização de faltas baseados em transitórios de alta frequência.

Além dessas duas grandes classes, pode-se ainda considerar a existência de um terceiro grupo de métodos de localização de faltas, os chamados métodos de localização de faltas baseados no conhecimento [36].

¹Conhecidos na literatura por *knowledge-based methods*.

²Conhecidos na literatura por *impedance-based methods*.

A Figura 4.1 apresenta uma classificação dos métodos de localização propostos na literatura em função do tipo de sinal empregado na estimação do ponto de falta. As características de cada uma dessas classes são explicadas com mais detalhes nas seções posteriores. A grande maioria dos métodos de localização baseados em transitórios de alta frequência faz uso do conceito de ondas viajantes. Esses métodos foram classificados na década de 1950 nos tipos A, B, C e D [68], de acordo com a natureza do sinal transitório utilizado na localização da falta. Os modernos localizadores de falta baseados em ondas viajantes utilizam simultaneamente métodos dos tipos A e D, e apresentam um tipo adicional, denominado tipo E [30]. Existe ainda a possibilidade, bastante rara na literatura, de um método baseado em transitórios de alta frequência não se valer do uso de ondas viajantes. Nesse caso, a técnica se enquadra em “Outras abordagens”. Os métodos de localização baseados em fasores de frequência fundamental podem utilizar dados de um único terminal da LT bem como dos dois terminais. Os baseados em fasores de um terminal podem ou não usar a informação das impedâncias das fontes de tensão conectadas aos terminais da LT (Z_S e Z_R , ver Figura 2.1). Já os métodos baseados em fasores dos dois terminais podem utilizar fasores sincronizados ou não-sincronizados. Como já descrito no capítulo de introdução deste trabalho, medidas não-sincronizadas resultam no acréscimo de um ângulo δ à diferença angular existente entre os fasores dos terminais S e R da linha (ver Seção 4.4.3). Assim, existem métodos baseados em fasores não-sincronizados que necessitam estimar o valor desse ângulo bem como abordagens independentes de δ .

4.2 Métodos de Localização de Falhas Baseados no Conhecimento

Os métodos de localização de falhas baseados no conhecimento utilizam ferramentas tais como redes neurais [69] e lógica *fuzzy* [70]. Em geral, esse tipo de técnica requer a utilização de informações externas, como as provenientes de alarmes de sistemas *supervisory control and data acquisition* (SCADA) [71], [72] e de sensores de tensão na carga bem como de relés de proteção e disjuntores que atuaram para a isolação de uma falta. Existem basicamente duas grandes abordagens [73]. A primeira consiste em analisar a relação entre as informações provenientes do monitoramento da rede com condições de falta armazenadas em uma estrutura do tipo árvore ou em uma tabela. A segunda baseia-se na comparação entre os resultados obtidos via simulação do sistema de proteção por relés e as informações provenientes do monitoramento da rede de energia elétrica. Em [45], [74] e [75] são apresentados alguns exemplos de técnicas de localização de falhas baseadas no conhecimento.

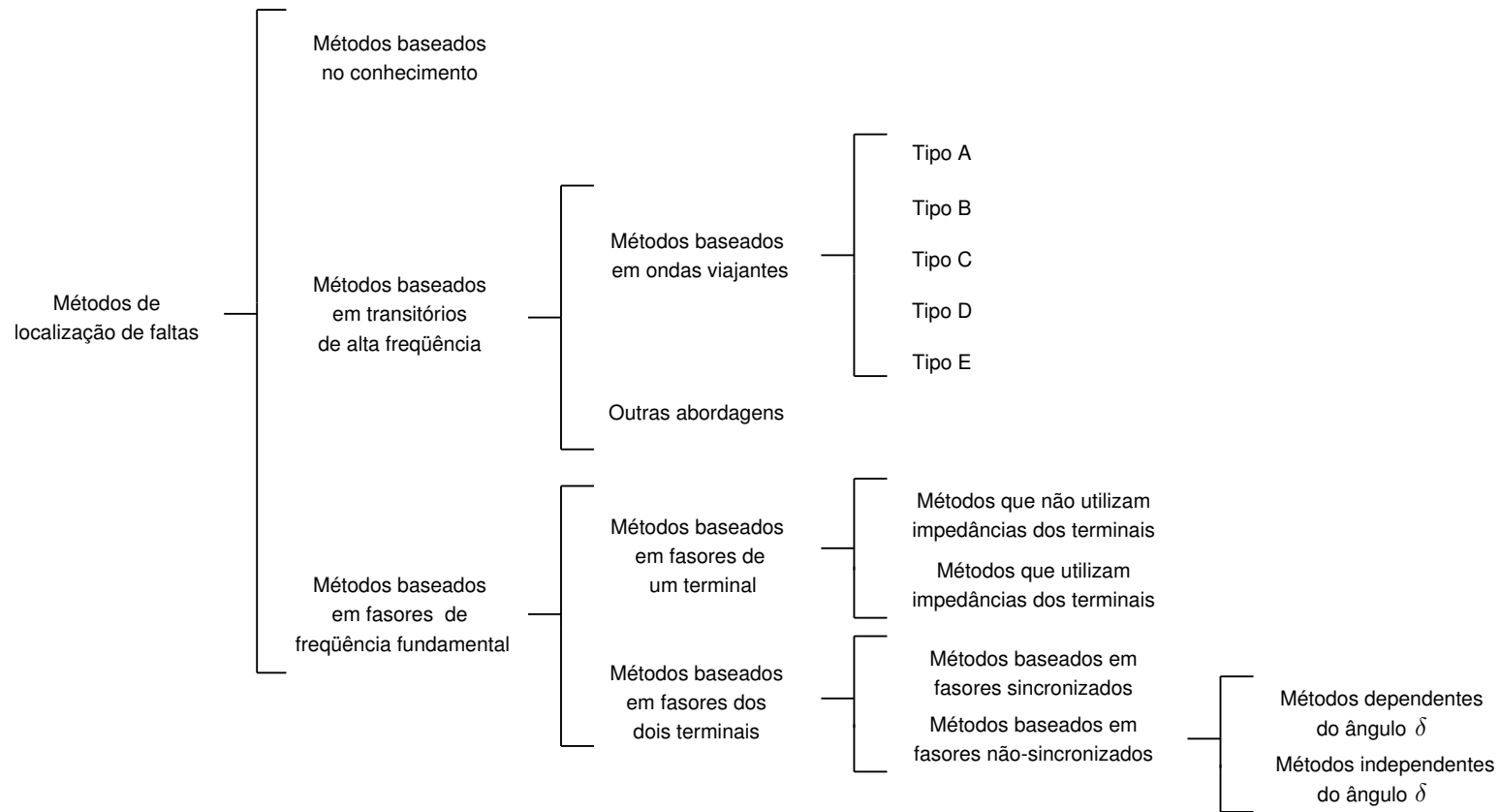


Figura 4.1: Classificação dos métodos de localização de faltas em linhas de transmissão em função do tipo de sinal empregado.

4.3 Métodos de Localização de Faltas Baseados em Transitórios de Alta Frequência

Descargas atmosféricas, faltas e chaveamentos em uma LT dão origem às chamadas ondas viajantes [76], que se propagam pela linha e são modificadas e refletidas nas suas discontinuidades: barramentos, fontes, transformadores e ponto de falta. Em outras palavras, tais perturbações criam ondas que viajam nos sentidos direto e reverso da LT e que vão sendo atenuadas e distorcidas pelas perdas da linha (efeitos Joule e Corona) até o momento em que se extinguem [76]. Dessa forma, o sistema elétrico passa a apresentar sinais transitórios de alta frequência³ superpostos aos de frequência fundamental quando da ocorrência de uma perturbação qualquer. Conseqüentemente, um sinal de tensão ou corrente medido no terminal de uma LT faltosa apresenta o componente de frequência fundamental e harmônicos bem como sinais exponenciais decrescentes e transitórios de alta frequência. Diferentemente dos métodos de localização de faltas baseados em fasores de frequência fundamental, os métodos baseados em transitórios de alta frequência utilizam toda essa informação oriunda de uma falta na tentativa de localizá-la.

Devido à natureza dos sinais que utilizam, os métodos baseados em transitórios de alta frequência requerem alta taxa de amostragem para que possam operar adequadamente. Além disso, a implementação dessas técnicas apresenta um maior custo em relação ao verificado em métodos baseados em fasores [32], [36]. Outra dificuldade que tais técnicas podem enfrentar advém da utilização de TPs capacitivos, que geram erros na estimativa de localização de falta por filtrarem as altas frequências [53].

Como mencionado anteriormente, a grande maioria dos métodos de localização baseados em transitórios de alta frequência utiliza o conceito de ondas viajantes. Tal classe de métodos é conhecida de longa data [77]. Na década de 1950, diversos sistemas experimentais foram testados, alguns deles gerando produtos comerciais [78]. Apesar de os resultados alcançados terem sido satisfatórios, os altos custos de instalação, operação e manutenção limitaram a utilização dos localizadores baseados em ondas viajantes [79]. Na década de 1990, esses métodos voltaram a ser utilizados na localização de faltas em LTs aéreas devido, principalmente, à necessidade de localizar rapidamente e com exatidão faltas em LTs muito longas e de EAT [78]. Em geral, esse tipo de linha possui compensação série (ver Seção 4.4.6) e é não-homogêneo, situação na qual os métodos baseados em fasores são inadequados. Outros fatores que levaram ao ressurgimento dos métodos baseados em ondas viajantes foram os avanços na aquisição de dados em alta velocidade, a sincronização de medidas via GPS e as melhorias nos sistemas de comunicação [78].

³As frequências desses sinais transitórios não são múltiplas da fundamental. Elas são frequências naturais do sistema de potência, associadas aos seus parâmetros elétricos.

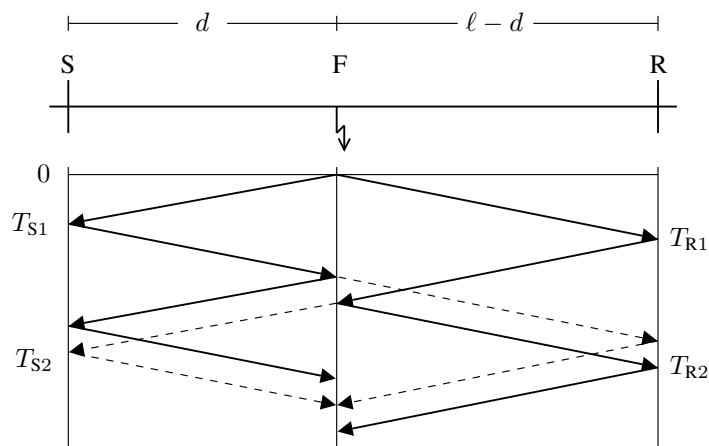


Figura 4.2: Diagrama de *lattice* para $d < \ell/2$.

4.3.1 Princípio Básico da Localização de Falhas Através de Ondas Viajantes

Uma ferramenta útil no estudo do comportamento das ondas viajantes é o chamado diagrama de *lattice* [76]. A Figura 4.2 apresenta um exemplo desse diagrama para uma LT monofásica sob condição de falta. Vale lembrar que essa abordagem também é válida para LTs trifásicas, pois pode-se utilizar uma transformação modal (Seção 3.3) a fim de obter três modos independentes (dois modos aéreos e um modo terra). O diagrama apresentado mostra que a falta ocorrida no ponto F cria duas ondas viajantes. Uma delas se propaga na direção do terminal S e a outra, na direção do terminal R da linha. Essas ondas chegam nos respectivos terminais nos tempos T_{S1} e T_{R1} , que são funções da velocidade de propagação ν , dada por (2.10), da distância d e do comprimento ℓ da linha. Assim,

$$T_{S1} = \frac{d}{\nu} \quad (4.1)$$

e

$$T_{R1} = \frac{\ell - d}{\nu}. \quad (4.2)$$

Ao chegarem nos terminais S e R, estas duas ondas são refletidas e retornam ao ponto F, onde uma parte de cada onda é refletida (linha cheia) e outra é transmitida (linha pontilhada). As ondas refletidas retornam então aos terminais S e R da linha nos tempos T_{S2} e T_{R2} , respectivamente. O conhecimento desses tempos de chegada permite estimar a localização da falta na LT (distância d).

Como mencionado na Seção 4.1, os localizadores de falta baseados em ondas viajantes foram classificados na década de 1950 nos tipos A, B, C e D [68] (ver Figura 4.1), de acordo com o seu modo de operação. Os tipos B e C atuam a partir da injeção de um pulso no terminal da LT ou no sistema de comunicação [79]. Por exemplo, o tipo C é baseado no

princípio do radar (*radio detection and ranging*): um pulso é aplicado em um terminal da LT e o tempo que a onda leva para viajar até o ponto F e retornar ao terminal de origem é medido. Sabendo que nesse período de tempo a onda viajante criada percorre uma distância $2d$, é possível estimar a localização da falta. Já os métodos dos tipos A e D utilizam os sinais gerados pela própria falta. Os do tipo A são baseados nos tempos de chegada das ondas viajantes em apenas um terminal da LT (T_{S1} e T_{S2}). Os métodos do tipo D utilizam os tempos de chegada das ondas viajantes em ambos os terminais da LT (T_{S1} e T_{R1}). Esses dois tipos foram estudados nesta pesquisa. Além desses quatro tipos, os localizadores de falta modernos baseados em ondas viajantes apresentam o tipo E, que é um modo de um terminal baseado nos transientes criados quando da reenergização de uma LT através do fechamento de um disjuntor. Esse método é equivalente ao método de impulso de corrente utilizado para a localização de defeitos em cabos subterrâneos [30]. Ele é usado na localização de faltas permanentes nas situações em que haja apenas um pequeno, ou mesmo nulo, fluxo de corrente (como no caso de condutores rompidos). Além disso, pode também ser utilizado para medir o comprimento de LTs sãs.

Primeiramente, considera-se o caso dos localizadores do tipo A (utilizam dados de um único terminal da LT). Conforme mostrado em [80], o princípio de localização nesse modo deve diferenciar faltas aterradas de faltas não-aterradas. Para faltas não-aterradas, as ondas transmitidas no ponto de falta F podem ser desconsideradas. Assim, a distância d é determinada através dos tempos de chegada das duas primeiras ondas diretas no terminal S da linha. Como no intervalo de tempo compreendido entre os instantes T_{S1} e T_{S2} a onda viajante percorre uma distância $2d$, pode-se deduzir que

$$d = \frac{\nu(T_{S2} - T_{S1})}{2}. \quad (4.3)$$

No caso de faltas aterradas, as ondas transmitidas devem ser consideradas. Se a falta for localizada antes da metade da LT, como no caso da Figura 4.2, o valor da variável d também é dado por (4.3). Se a falta ocorrer na segunda metade da LT, a onda refletida no terminal R e transmitida em F chega antes do que a segunda onda direta no terminal S⁴. Assim, sabendo-se que a onda direta percorreu uma distância d no tempo T_{S1} e que a onda transmitida percorreu uma distância $(\ell - d) + \ell$ no tempo T_{S2} , determina-se que

$$d = \ell - \frac{\nu(T_{S2} - T_{S1})}{2}. \quad (4.4)$$

Já os algoritmos do tipo D utilizam os dados dos dois terminais da LT. Para tal, é necessária uma sincronização entre as medidas tomadas nos terminais S e R. Esse tipo de localizador apresenta uma vantagem sobre o tipo A. Como visto anteriormente, a onda

⁴Considere que o terminal local da Figura 4.2 seja o R e que o remoto seja o S. Pode-se então constatar que a segunda onda a chegar no terminal local é a que foi refletida no terminal remoto e transmitida no ponto F.

refletida no terminal S viaja até o ponto F, onde é novamente refletida. Entretanto, se o arco da falta já tiver se extinguido nesse momento, a onda não será refletida e, conseqüentemente, o tempo T_{S2} não poderá ser medido [68], [79], gerando problemas para um localizador do tipo A. Como um localizador do tipo D utiliza os tempos T_{S1} [dado por (4.1)] e T_{R1} [dado por (4.2)], tal problema é evitado. Fazendo $T_{R1} - T_{S1}$ e efetuando as devidas manipulações matemáticas, determina-se que

$$d = \frac{\ell + (T_{S1} - T_{R1})\nu}{2}. \quad (4.5)$$

4.3.2 Exemplos de Algoritmos Baseados em Transitórios de Alta Frequência

Um dos mais importantes métodos de localização de faltas baseado em ondas viajantes é o apresentado em [81] e [82]. Tal abordagem usa a correlação cruzada entre uma seção da primeira onda viajante direta e a segunda onda viajante reversa, refletida no ponto F e que retorna ao terminal S, onde o relé de proteção está instalado. O desempenho do método depende da largura da janela de dados utilizada para armazenar o formato da primeira onda viajante. O tamanho da janela depende do ponto de falta, que por ser desconhecido, pode comprometer a implementação do algoritmo. Esse método é mais aplicado como função de proteção do que propriamente na localização de faltas.

Uma técnica baseada no domínio da seqüência é apresentada em [83] e [84]. Esse é um raro exemplo de algoritmo de localização de faltas baseado em transitórios de alta frequência que não utiliza o conceito de ondas viajantes, se enquadrando na classificação “Outras abordagens” da Figura 4.1. A LT é modelada através de suas impedâncias próprias e mútuas, levando em conta apenas parâmetros série, visto que o método considera LTs curtas. Como é possível atribuir valores diferentes para cada uma dessas impedâncias, a abordagem não é limitada a LTs transpostas. O método utiliza medidas sincronizadas de tensão e corrente de ambos os terminais da LT. A idéia básica vem do fato de que somente no ponto de falta F as tensões temporais de cada fase podem ser obtidas tanto a partir das medidas do terminal S quanto das do terminal R da linha (Figura 4.3). Para obter um desempenho adequado, o algoritmo depende do uso de uma taxa de amostragem alta de modo a permitir uma aproximação satisfatória das derivadas temporais da corrente. Além disso, o método numérico utilizado para realizar a diferenciação numérica exerce influência sobre o erro de localização de falta do algoritmo. O método resolve as equações diferenciais de maneira semelhante à adotada em algoritmos utilizados na função de proteção [85]–[87], exceto pelo fato de considerar todo o espectro de frequência do sinal em vez de apenas o seu componente fundamental. Para LTs longas, a referência em questão propõe uma abordagem baseada em ondas viajantes.

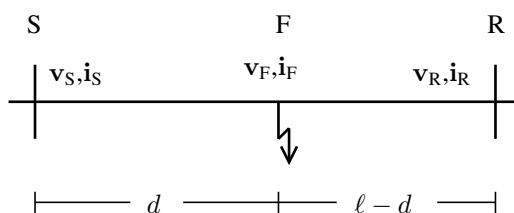


Figura 4.3: Linha de transmissão trifásica em falta.

Como em outros ramos da engenharia, a transformada *wavelet* também vem sendo utilizada com sucesso na análise de transitórios em sistemas de potência. Pode-se atribuir ao trabalho apresentado em [88] o mérito de ter sido o primeiro a considerar tal transformada para esse fim. A partir daí, várias abordagens de localização de faltas utilizando a transformada *wavelet* vêm sendo propostas. Um exemplo é o método apresentado em [89] (tipo A), que utiliza a análise multirresolução [90] para obter os coeficientes *wavelet* do sinal de tensão medido no terminal local da LT. Desacoplando esses coeficientes através da transformação de Clarke, o tipo de falta é identificado e a localização da falta é estimada através de (4.3) ou (4.4). Outra possível abordagem de localização de faltas do tipo A que também faz uso da transformada *wavelet* é apresentada em [91]. Um método de localização de faltas baseado em dados dos dois terminais (tipo D) é apresentado em [92]. O trabalho utiliza a transformada *wavelet* contínua para determinar com melhor exatidão os tempos de chegada T_{S1} e T_{R1} e a velocidade de propagação através de um coeficiente ótimo de dilatação. Além disso, a abordagem adota uma formulação alternativa para (4.5), que considera a maior atenuação que a onda viajante sofre de acordo com a posição da falta na LT.

4.4 Métodos de Localização de Faltas Baseados em Fasores de Frequência Fundamental

A maioria dos métodos de localização de faltas se enquadra na categoria de métodos baseados em fasores de frequência fundamental [36]. Algumas dessas técnicas estão implementadas em produtos comerciais, como localizadores de falta *stand alone* ou em funções incorporadas em relés de proteção. Como mostra a Figura 4.1, eles se subdividem em duas grandes classes:

- métodos baseados em fasores de um terminal;
- métodos baseados em fasores dos dois terminais.

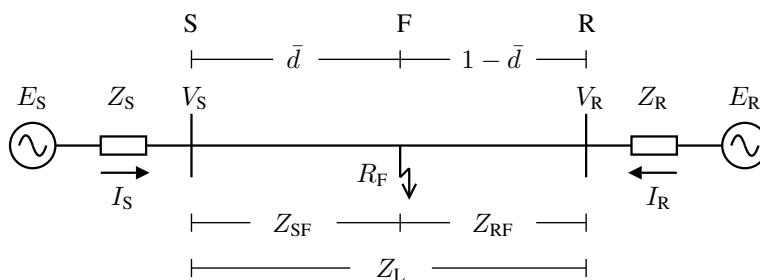


Figura 4.4: Diagrama unifilar de uma linha de transmissão em falta.

Em síntese, os métodos baseados nos sinais de frequência fundamental consideram como variáveis de entrada os fasores de tensão e corrente⁵ extraídos das medidas de um ou dos dois terminais da LT faltosa. A maioria dos métodos de um terminal necessita tanto dos fasores de pré-falta quanto dos fasores de pós-falta para estimar a localização da falta, uma vez que utilizam o princípio da superposição apresentado na Seção 3.4. Já a maioria dos métodos de dois terminais estudados utiliza apenas os fasores de pós-falta no processo de localização de falta.

4.4.1 Princípio Básico dos Métodos Baseados em Fasores de Um Terminal

Considere o diagrama unifilar de uma LT homogênea operando sob condição de falta apresentado na Figura 4.4. A idéia básica da maioria dos métodos de localização de faltas baseados em fasores de um terminal consiste em tentar determinar a impedância Z_{SF} a partir dos fasores de tensão e corrente medidos no terminal S da linha e, a partir dessa informação, estimar a localização da falta.

Por se tratar de um sistema desequilibrado pela falta, vamos considerar a impedância de seqüência positiva do trecho entre o terminal S e o ponto de falta F. Como $Z_{L1} = \ell Z_{u1}$ é um parâmetro conhecido e Z_{SF1} pode ser determinado via medidas de tensão e corrente no terminal S, a localização da falta pode ser obtida isolando \bar{d} em (2.5) (considerando impedâncias de seqüência positiva). Assim,

$$\bar{d} = \frac{Z_{SF1}}{Z_{L1}}. \quad (4.6)$$

Para faltas sólidas ($R_F = 0$), as expressões da impedância Z_{SF1} para cada um dos possíveis tipos de falta são as apresentadas na Tabela 4.1 (ver deduções no Apêndice C), onde I_r

⁵Existem abordagens que não utilizam fasores de corrente a fim de evitar erros oriundos principalmente da saturação de TCs.

Tabela 4.1: Expressões para o cálculo da impedância de seqüência positiva do trecho SF (Z_{SF1}) de uma linha de transmissão com falta sólida

Tipo de falta	Impedância Z_{SF1}
Fase A-terra	$V_A/(I_A + k_0 I_r)$
Fase B-terra	$V_B/(I_B + k_0 I_r)$
Fase C-terra	$V_C/(I_C + k_0 I_r)$
Fase A-B ou fase A-B-terra	V_{AB}/I_{AB}
Fase B-C ou fase B-C-terra	V_{BC}/I_{BC}
Fase C-A ou fase C-A-terra	V_{CA}/I_{CA}
Trifásica	V_{AB}/I_{AB} ou V_{BC}/I_{BC} ou V_{CA}/I_{CA}

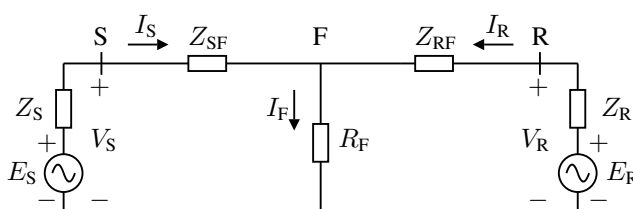


Figura 4.5: Circuito equivalente de seqüência positiva para uma falta trifásica.

representa a corrente residual dada por

$$I_r = I_A + I_B + I_C = 3I_0 \quad (4.7)$$

e

$$k_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}} \quad (4.8)$$

com Z_{L0} representando a impedância de seqüência zero da LT.

No entanto, a condição de falta sólida dificilmente ocorre na prática porque as faltas apresentam um arco elétrico de natureza resistiva. Sendo assim, as expressões mostradas na Tabela 4.1 são ineficientes para a localização da maioria das faltas reais. Para superar tal limitação, deve-se incluir o efeito da resistência de falta R_F no processo de estimação da impedância Z_{SF1} .

Como feito na Seção 3.4, vamos considerar novamente uma condição de falta trifásica na LT ilustrada na Figura 4.4. Por ser uma falta equilibrada, todos os fasores são formados exclusivamente por componentes de seqüência positiva, o que permite analisar o sistema de potência trifásico da Figura 4.4 através do seu circuito equivalente monofásico ilustrado na Figura 4.5 (circuito de seqüência positiva, ver Apêndice B). Por simplicidade, iremos novamente omitir o índice “1” na notação das impedâncias e dos fasores de seqüência positiva utilizada nesta seção.

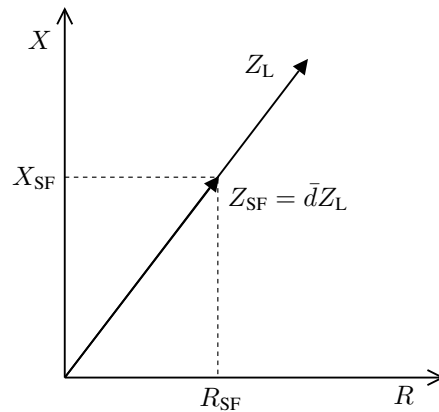


Figura 4.6: Representação gráfica da impedância Z_{SF} .

É interessante separar a impedância Z_{SF} em parte real R (resistência) e parte imaginária X (reatância). Assim,

$$Z_{SF} = R_{SF} + jX_{SF}. \quad (4.9)$$

O plano complexo da Figura 4.6 apresenta as impedâncias Z_{SF} e Z_L de forma gráfica. Pode-se notar que elas estão em fase, uma vez que Z_{SF} representa apenas uma parcela da impedância da linha Z_L ($Z_{SF} = \bar{d}Z_L$).

Através dos fasores V_S e I_S , obtidos via medição no terminal local, não é possível determinar diretamente Z_{SF} . Pode-se sim calcular a impedância aparente

$$Z_a = \frac{V_S}{I_S} = R_a + jX_a \quad (4.10)$$

vista pelo terminal S da LT. Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões na malha esquerda do circuito equivalente mostrado na Figura 4.5, pode-se deduzir que

$$V_S = Z_{SF}I_S + R_F I_F. \quad (4.11)$$

Assim, a impedância aparente medida no terminal local da linha é dada por

$$Z_a = \frac{V_S}{I_S} = Z_{SF} + R_F \frac{I_F}{I_S}. \quad (4.12)$$

Portanto, pode-se considerar que a impedância aparente Z_a vista pelo terminal S é composta por dois termos:

$$Z_a = Z_{SF} + Z_{falta} \quad (4.13)$$

onde

$$Z_{falta} = R_F \frac{I_F}{I_S}. \quad (4.14)$$

Apesar de R_F ser um parâmetro real (faltas são de natureza puramente resistiva), a razão entre I_F e I_S é, em geral, uma grandeza complexa. Assim, o efeito que a falta causa em (4.12) é realmente o de uma impedância, que pode ser de natureza indutiva ou capacitiva dependendo da fase do termo I_F/I_S em (4.14). A única forma de a impedância Z_{falta} ser puramente real é se os fasores I_F e I_S estiverem em fase.

Para entender melhor os parâmetros que afetam a fase de I_F/I_S , pode-se utilizar o princípio da superposição apresentado na Seção 3.4 a fim de escrever (4.14) em função dos fatores de carga e de distribuição de corrente. Denotando I_L como a corrente de pré-falta no terminal S [correntes I'_S nas redes das Figuras 3.7(b) e 3.8(b)], a variação da corrente I_S devido à ocorrência da falta é

$$\Delta I_S = I_S - I_L. \quad (4.15)$$

Multiplicando e dividindo (4.14) por ΔI_S , chega-se a

$$Z_{\text{falta}} = R_F \frac{I_F}{\Delta I_S} \frac{\Delta I_S}{I_S}. \quad (4.16)$$

Como visto na Seção 3.4, o fator de carga é dado por

$$n_s = \frac{I_S}{\Delta I_S} = |n_s| e^{j\theta}$$

e o fator de distribuição de corrente é definido como

$$d_s = \frac{\Delta I_S}{I_F} = \frac{Z_R + (1 - \bar{d})Z_L}{Z_R + Z_L + Z_S} = |d_s| e^{j\beta}.$$

Portanto, (4.16) pode ser reescrita como

$$Z_{\text{falta}} = R_F \frac{1}{d_s n_s}. \quad (4.17)$$

Expressando (4.17) em termos de magnitude e fase (forma polar), chega-se a

$$Z_{\text{falta}} = \frac{R_F}{|d_s| |n_s|} e^{j(-\beta - \theta)}. \quad (4.18)$$

Portanto, o ângulo de fase de Z_{falta} em (4.18) é determinado exclusivamente pelos ângulos β e θ . Como já evidenciado na Seção 3.4.3, no caso de um sistema homogêneo, no qual tanto o ângulo de fase de Z_S quanto o de Z_R são iguais ao ângulo de fase de Z_L , $\beta = 0$. Já a fase θ é diferente de zero se houver um fluxo de potência no sistema. No entanto, se a magnitude de I_S for muito maior do que a magnitude da corrente de carga I_L , $\theta \approx 0$. A soma de β e θ determina o componente reativo de Z_{falta} , conforme mostrado a seguir.

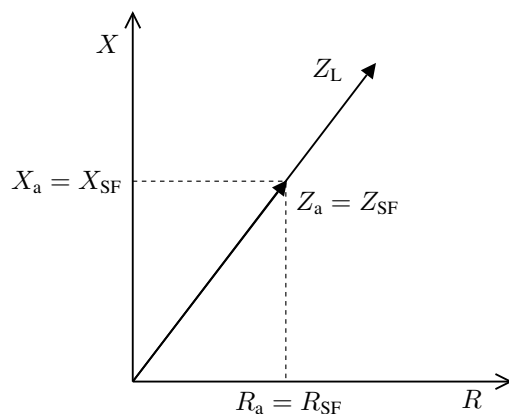


Figura 4.7: Impedância aparente Z_a para $Z_{falta} = 0$ (falta sólida).

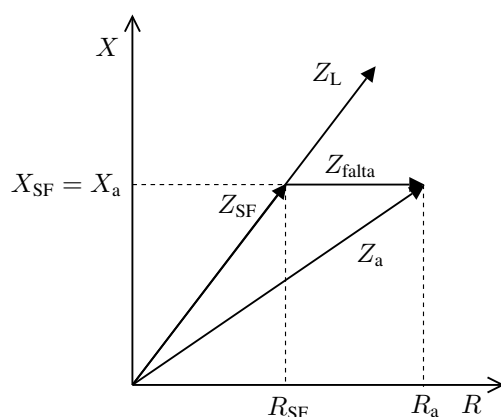


Figura 4.8: Impedância aparente Z_a para Z_{falta} real ($\beta = \theta = 0$).

Caso 1: Falta sólida

Para o caso de uma falta sólida, $Z_{falta} = 0$ uma vez que $R_F = 0$. Portanto, a parcela de (4.13) referente à falta torna-se nula e

$$Z_a = Z_{SF}.$$

Esta é a situação ideal para um algoritmo baseado em fasores de um terminal, pois a impedância aparente vista pelo terminal S é a própria impedância do trecho SF da linha. A Figura 4.7 permite interpretar esse resultado de forma gráfica.

Se $R_F \neq 0$, algumas situações diferentes podem ocorrer dependendo dos valores dos ângulos β e θ . Nesse caso, a magnitude do termo Z_{falta} é proporcional à resistência de falta, como pode ser visto através de (4.18).

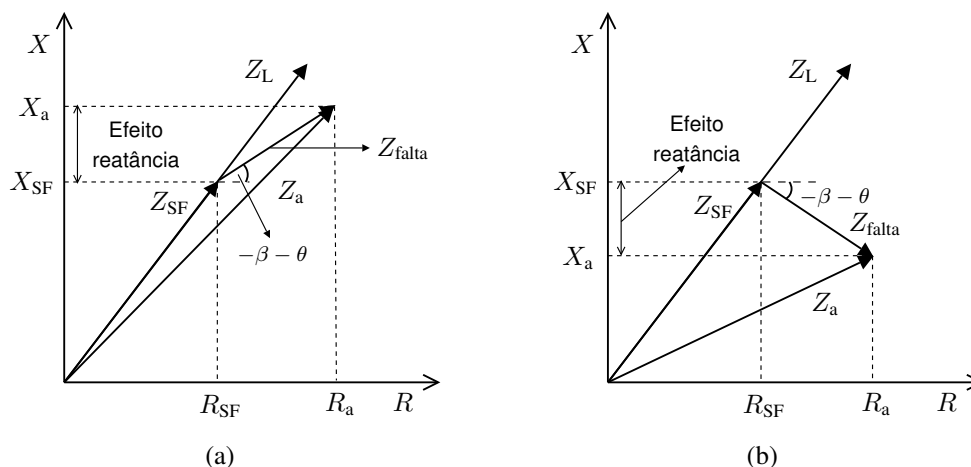


Figura 4.9: Impedância aparente Z_a para Z_{falta} complexa. (a) Fase $-\beta - \theta > 0$. (b) Fase $-\beta - \theta < 0$.

Caso 2: Falta não-sólida e $\beta = \theta = 0$

Pode-se verificar através de (4.18) que se $R_F \neq 0$ e $\beta = \theta = 0$, a impedância Z_{falta} é puramente real [I_F em fase com I_S , ver (4.14)]. A análise gráfica desse caso através da Figura 4.8 facilita o seu entendimento. Pode-se notar nesse plano complexo que a característica puramente resistiva de Z_{falta} torna $R_a \neq R_{\text{SF}}$. Entretanto, a reatância aparente X_a vista pelo terminal S da linha é a própria reatância X_{SF} do trecho SF.

Caso 3: Falta não-sólida e $-\beta - \theta \neq 0$

Se $R_F \neq 0$ e $-\beta - \theta \neq 0$ (fasores I_F e I_S defasados um do outro), duas situações podem ocorrer. Se $-\beta - \theta > 0$, Z_{falta} é uma impedância de natureza indutiva; caso contrário, a sua natureza é capacitiva. Essas duas situações são mostradas no plano complexo da Figura 4.9. Nesses casos, tanto a resistência quanto a reatância aparente medidas no terminal S são diferentes da resistência e da reatância do trecho SF da linha. Assim, verifica-se o surgimento do chamado efeito reatância: apesar de a falta ser puramente resistiva, a reatância aparente X_a medida no terminal S é diferente da reatância X_{SF} da linha.

4.4.2 Principais Métodos Baseados em Fasores de Um Terminal

O estudo apresentado anteriormente nos permite concluir que a resistência de falta torna a impedância aparente vista pelo terminal S da linha diferente da impedância do trecho SF da LT. Os métodos de localização de faltas baseados em fasores de um terminal tentam contornar essa característica indesejável através da adoção de suposições e da utilização do princípio da superposição. Ainda assim, eles apresentam um erro na estimativa do ponto de falta, cuja magnitude depende de quão exata é a aproximação utilizada para uma determinada condição de falta. Como principal vantagem, os métodos baseados em fasores de um

único terminal não necessitam de um canal de comunicação para transmissão das medidas do terminal remoto para o local. Como mostrado na Seção 4.1, os métodos baseados em fasores de um terminal podem usar ou não a informação das impedâncias das fontes conectadas aos terminais da LT. Iremos iniciar o presente estudo pelos métodos que não necessitam de tal informação.

O método de um terminal mais simples, bastante utilizado na prática, é o baseado na reatância aparente X_a medida no terminal S da LT. Como uma falta é sempre resistiva, essa abordagem consiste em utilizar apenas a parte imaginária de

$$Z_a = \frac{V_S}{I_S} \quad (4.19)$$

para estimação da distância \bar{d} . Em outras palavras, esse método se baseia somente na reatância aparente medida no terminal S da linha, desprezando o termo Z_{falta} em (4.13). Considerando que essa reatância medida seja igual à reatância do trecho SF da linha, pode-se escrever

$$\text{Im}(Z_a) = X_{SF} = \bar{d} \text{Im}(Z_L). \quad (4.20)$$

Isolando \bar{d} nessa expressão, obtém-se uma estimativa de localização de falta dada por

$$\bar{d} = \frac{\text{Im}(Z_a)}{\text{Im}(Z_L)} = \frac{\text{Im}(V_S/I_S)}{\text{Im}(Z_L)} = \frac{X_a}{X_L}. \quad (4.21)$$

Para faltas sólidas ou com I_F em fase com I_S ($\beta = \theta = 0$), situações apresentadas, respectivamente, nos Casos 1 e 2 da seção anterior, o erro do algoritmo é nulo (ver Figuras 4.7 e 4.8, nas quais $X_a = X_{SF}$). Entretanto, se a corrente de falta I_F não estiver em fase com a corrente I_S (Caso 3), o efeito reatância pode ser considerável dependendo do valor da resistência de falta e dos valores das fases β e θ (ver Figura 4.9, na qual $X_a \neq X_{SF}$).

Um dos métodos de localização de faltas baseado em fasores mais referenciados na literatura é o apresentado em [63]. Nesse caso, o seu princípio de funcionamento não é derivado diretamente da impedância aparente Z_a definida através de (4.12). Considere a LT monofásica com falta de resistência R_F mostrada na Figura 4.10(a). Utilizando o princípio da superposição apresentado na Seção 3.4, é possível separar a rede de pós-falta nas redes de pré-falta e de falta ilustradas nas Figuras 4.10(b) e (c), respectivamente. Pode-se verificar que a tensão no ponto F é dada por

$$V_F = R_F I_F. \quad (4.22)$$

Como

$$I_F = 0 + I_F'' = -(I_{FS}'' + I_{FR}'') \quad (4.23)$$

pode-se escrever

$$V_F = -R_F (I_{FS}'' + I_{FR}''). \quad (4.24)$$

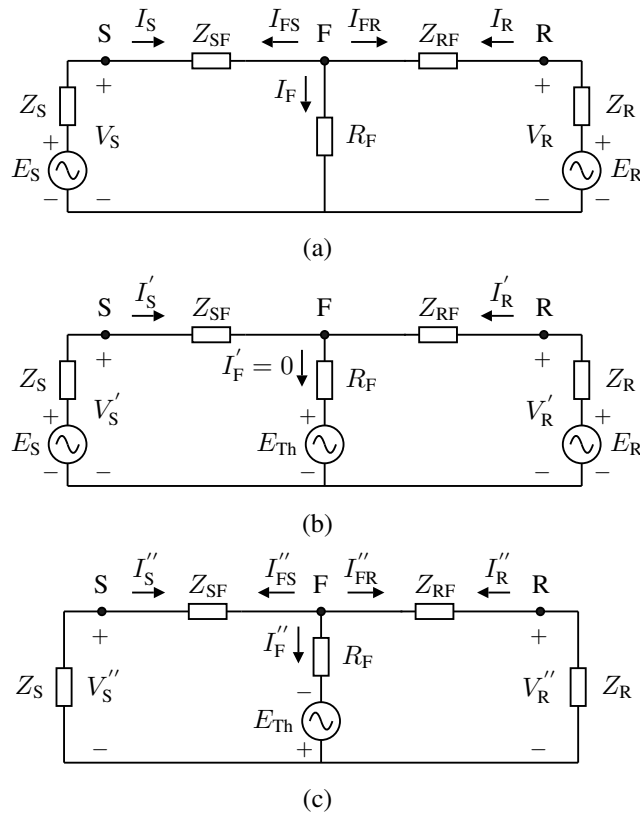


Figura 4.10: Modelagem baseada no princípio da superposição. (a) Rede de pós-falta. (b) Rede de pré-falta. (c) Rede de falta.

O método define a seguinte razão entre correntes:

$$K(d) = \frac{I''_{FR}}{I''_{FS}}. \quad (4.25)$$

Essa razão K é função da distância d porque tanto I''_{FS} quanto I''_{FR} são dadas por (2.18) considerando $x = d$ e $\ell - d$, respectivamente. Substituindo $I''_{FR} = K(d)I''_{FS}$ em (4.24), define-se que a tensão no ponto F é

$$V_F = -R_F I''_{FS} [1 + K(d)]. \quad (4.26)$$

Logo,

$$R_F [1 + K(d)] = -\frac{V_F}{I''_{FS}}. \quad (4.27)$$

Através de (2.17) e (2.18) pode-se calcular V_F e I''_{FS} em função dos fasores medidos no terminal S da linha e da distância de falta⁶. Assim,

$$V_F = AV_S - BI_S \quad (4.28)$$

⁶Note que as redes a parâmetros concentrados mostradas na Figura 4.10 são apenas ilustrativas, uma vez que o método utiliza uma modelagem a parâmetros distribuídos para calcular V_F e I''_{FS} . Pode-se facilmente constatar que se o método utilizasse os modelos apresentados na Figura 4.10, a corrente I''_{FS} seria igual a $-I''_S$.

e

$$I_{FS}'' = CV_S'' - DI_S'' \quad (4.29)$$

onde

$$A = D = \cosh(\gamma d) \quad (4.30)$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma d) \quad (4.31)$$

e

$$C = \frac{\sinh(\gamma d)}{Z_c}. \quad (4.32)$$

Vale lembrar que $I_S'' = I_S - I_S'$ e $V_S'' = V_S - V_S'$ (diferenças entre fasores medidos no terminal S da LT na condição de pós-falta e de pré-falta). Substituindo (4.28) e (4.29) em (4.27), determina-se

$$R_F[1 + K(d)] = -\frac{AV_S - BI_S}{CV_S'' - DI_S''}. \quad (4.33)$$

Nesse ponto é necessário assumir duas suposições: a LT é sem perdas e as impedâncias das fontes são puramente indutivas, o que torna a razão $K(d)$ puramente real [63]. Nesse tipo de situação, o lado esquerdo de (4.33) é puramente real, o que permite utilizar apenas a parte imaginária dessa expressão a fim de eliminar a influência da resistência de falta R_F (parâmetro desconhecido). Assim,

$$\text{Im} \left[\frac{AV_S - BI_S}{CV_S'' - DI_S''} \right] = 0. \quad (4.34)$$

A solução de (4.34) fornece uma estimativa da localização da falta. Como essa equação é não-linear, deve-se utilizar um método iterativo, como o Newton-Raphson [93], para determinar o valor da variável d . As suposições necessárias para a definição de (4.34) afetam o desempenho do algoritmo caso elas não sejam satisfeitas. Como (4.34) foi definida considerando redes monofásicas, tal expressão só é utilizada na localização de faltas trifásicas (equilibradas). Para outros tipos de faltas devem-se utilizar os componentes modais ou simétricos das grandezas envolvidas em (4.34). No caso de utilização dos componentes simétricos, as expressões empregadas pelo método de Takagi são as mostradas na Tabela 4.2 [94], [95], onde

$$V_{Fm} = A_m V_{Sm} - B_m I_{Sm} \quad (m = 0, 1 \text{ ou } 2). \quad (4.35)$$

Logo, esse método de localização requer uma etapa de classificação do tipo de falta. O seu desempenho é afetado principalmente pela resistência, pela posição, pelo tipo e pelo ângulo de incidência da falta, bem como pelas impedâncias das fontes [37], [94]. O erro de localização de falta dessa técnica tende a crescer nos casos de faltas próximas ao terminal R da linha e/ou de elevada resistência, para faltas trifásicas e para sistemas que apresentem uma impedância da fonte com elevada parcela resistiva.

Tabela 4.2: Expressões utilizadas pelo método de Takagi para cada tipo de falta

Tipo de falta	Expressão
Fase-terra	$\text{Im} \left[\frac{V_{F0} + V_{F1} + V_{F2}}{C_1 V_{S1}'' - D_1 I_{S1}''} \right] = 0$
Fase-fase	$\text{Im} \left[\frac{V_{F1} - V_{F2}}{C_1 V_{S1}'' - D_1 I_{S1}''} \right] = 0$
Fase-fase-terra	$\text{Im} \left[\frac{V_{F1} - V_{F0}}{C_0 V_{S0}'' - D_0 I_{S0}''} \right] = 0$
Trifásica	$\text{Im} \left[\frac{V_{F1}}{C_1 V_{S1}'' - D_1 I_{S1}''} \right] = 0$

Em [64], é apresentada uma técnica semelhante à descrita anteriormente, mas que faz uso de uma análise transiente em vez de em regime permanente através da utilização da transformada de Laplace [38]. Os próprios autores concluem em [64] que o desempenho do método apresentado em [63] é superior ao da técnica baseada na transformada de Laplace.

A fim de minimizar o efeito reatância que prejudica o desempenho do método de localização de faltas baseado na reatância aparente vista pelo terminal S da linha, pode-se eliminar o efeito da corrente de carga I_L (corrente de pré-falta no terminal S da LT) através da determinação da variação da corrente quando da ocorrência de uma falta (ΔI_S). Essa estratégia é apresentada por vários autores [30], mas ficou mais conhecida através da referência [65]⁷. Apesar de a dedução aqui apresentada ser diferente da desenvolvida em [65], o resultado final é idêntico. Inicialmente, a tensão no terminal S da LT, dada por (4.11), deve ser rescrita como

$$V_S = \bar{d}Z_L I_S + R_F I_F \frac{\Delta I_S}{\Delta I_S}. \quad (4.36)$$

Substituindo $d_s = \Delta I_S / I_F$ (ver Seção 3.7) em (4.36), pode-se obter

$$V_S = \bar{d}Z_L I_S + R_F \frac{\Delta I_S}{d_s}. \quad (4.37)$$

Multiplicando ambos os lados de (4.37) pelo complexo conjugado de ΔI_S (ΔI_S^*), chega-se a

$$V_S \Delta I_S^* = \bar{d}Z_L I_S \Delta I_S^* + R_F \frac{|\Delta I_S|^2}{d_s}. \quad (4.38)$$

⁷Note que Toshio Takagi é o primeiro autor dos trabalhos [63], [64] e [65]. Tal fato gera uma confusão na literatura, pois o termo método de Takagi é empregado tanto para a técnica apresentada em [63] quanto para a proposta em [65]. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, é mais comum denominar como método de Takagi a técnica apresentada em [63].

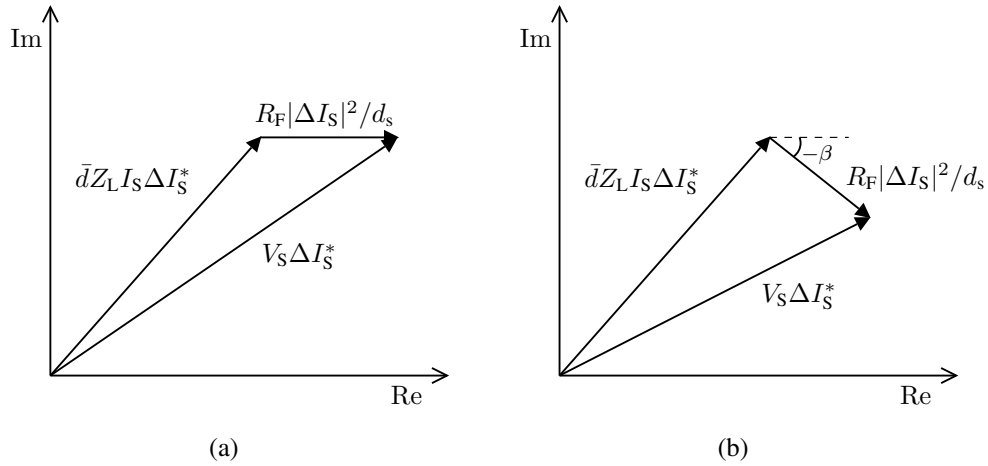


Figura 4.11: Representação gráfica da expressão (4.38). (a) Fator d_s real ($\beta = 0$). (b) Fator d_s imaginário ($\beta > 0$).

Tomando apenas as partes imaginárias de (4.38), determina-se que

$$\text{Im}(V_S \Delta I_S^*) = \text{Im}(\bar{d} Z_L I_S \Delta I_S^*) + R_F \text{Im} \left(\frac{|\Delta I_S|^2}{d_s} \right). \quad (4.39)$$

Pode-se notar que (4.39) é dependente da resistência de falta R_F . Para eliminar a influência desse parâmetro desconhecido, deve-se supor que o sistema de potência é homogêneo, situação na qual o fator de distribuição de corrente d_s é puramente real (fase β nula, ver Seção 3.4.3). Nesse caso,

$$\text{Im} \left(\frac{|\Delta I_S|^2}{d_s} \right) = 0 \quad (4.40)$$

o que implica

$$\text{Im}(V_S \Delta I_S^*) = \text{Im}(\bar{d} Z_L I_S \Delta I_S^*). \quad (4.41)$$

Tal situação é ilustrada na Figura 4.11(a), onde pode-se verificar graficamente que as partes imaginárias de $V_S \Delta I_S^*$ e $\bar{d} Z_L I_S \Delta I_S^*$ são iguais, uma vez que o termo $R_F |\Delta I_S|^2 / d_s$ é puramente real. Como a distância \bar{d} em (4.41) é um parâmetro real, pode-se fazer

$$\text{Im}(V_S \Delta I_S^*) = \bar{d} \text{Im}(Z_L I_S \Delta I_S^*). \quad (4.42)$$

Isolando \bar{d} em (4.42), determina-se que a localização da falta obtida pelo método em questão é

$$\bar{d} = \frac{\text{Im}(V_S \Delta I_S^*)}{\text{Im}(Z_L I_S \Delta I_S^*)}. \quad (4.43)$$

Note que a influência do fator de carga n_s foi eliminada, uma vez que (4.43) é independente de θ . A exatidão da estimativa dada por (4.43) é dependente de uma fase β do fator de distribuição de corrente d_s nula. Se a suposição de sistema homogêneo não for

Tabela 4.3: Expressões utilizadas pelo método baseado em (4.41) para cada tipo de falta

Tipo de falta	Expressão
Fase-terra	$\bar{d} = \frac{\text{Im}[(V_{S0} + V_{S1} + V_{S2})\Delta I_{S1}^*]}{\text{Im}[(Z_{L0}I_{S0} + Z_{L1}I_{S1} + Z_{L2}I_{S2})\Delta I_{S1}^*]}$
Fase-fase	$\bar{d} = \frac{\text{Im}[(V_{S1} - V_{S2})\Delta I_{S1}^*]}{\text{Im}[(Z_{L1}I_{S1} - Z_{L2}I_{S2})\Delta I_{S1}^*]}$
Fase-fase-terra	$\bar{d} = \frac{\text{Im}[(V_{S1} - V_{S0})\Delta I_{S0}^*]}{\text{Im}[(Z_{L1}I_{S1} - Z_{L0}I_{S0})\Delta I_{S0}^*]}$
Trifásica	$\bar{d} = \frac{\text{Im}(V_{S1}\Delta I_{S1}^*)}{\text{Im}(Z_{L1}I_{S1}\Delta I_{S1}^*)}$

verdadeira, $\beta \neq 0$ (fasor I_F defasado em relação ao fasor I_S), o que implica um erro na estimativa de localização para falta não-sólida. A Figura 4.11(b) apresenta um exemplo no qual $\beta > 0$, situação em que (4.40) não é satisfeita. Portanto, o desempenho desse método na localização de faltas em sistemas não-homogêneos depende da resistência de falta R_F e da fase β , que varia também com a própria localização da falta (\bar{d}) (ver Seção 3.4). Quanto maior esse ângulo, maior essa influência, que é análoga ao efeito reatância mostrado na Figura 4.11(b). Além disso, como a LT é modelada apenas pela sua impedância série, esse método só é útil na localização de faltas em linhas curtas, de até 100 km de acordo com [65]. Considerando a utilização da decomposição em componentes simétricos, as expressões para a localização de qualquer tipo de falta são as mostradas na Tabela 4.3 [95]. Assim, esse algoritmo também requer uma etapa de identificação do tipo de falta.

Se as impedâncias das fontes (Z_S e Z_R) conectadas aos terminais da LT forem conhecidas, o fator de distribuição de corrente d_S pode ser estimado através de (3.21) e a localização de uma falta através dos fasores medidos no terminal S da linha pode apresentar maior precisão. A desvantagem desse tipo de abordagem é necessitar de uma adequada modelagem das impedâncias das fontes. Como já mencionado, um sistema de potência no nível de transmissão é interligado e sofre alterações de configuração que levam a modificar os valores dessas impedâncias [53].

O método conhecido como Takagi modificado propõe utilizar a corrente de seqüência zero no lugar da corrente de falta ΔI_S e o ângulo β estimado a partir de (3.21) para um valor específico de \bar{d} . Nesse caso, a estimativa da localização da falta é

$$\bar{d} = \frac{\text{Im}(V_S I_0^* e^{-j\beta})}{\text{Im}(Z_L I_S I_0^* e^{-j\beta})}. \quad (4.44)$$

Assim, o método busca melhorar a localização da falta através da inclusão do ângulo β na expressão de \bar{d} . Entretanto, como esse ângulo é calculado para um valor particular de \bar{d} , a

localização da falta só é precisa para este ponto específico. Falhas aterradas que ocorram em outros pontos da LT, para os quais β é diferente, apresentam um erro de localização maior.

Uma outra metodologia que também utiliza as informações das impedâncias Z_S e Z_R é apresentada em [66]. Substituindo (3.27) em (4.37), determina-se uma equação de segundo grau do tipo

$$\bar{d}^2 - k_1 \bar{d} + k_2 - k_3 R_F = 0 \quad (4.45)$$

com coeficientes complexos dados por

$$k_1 = \frac{V_S}{I_S Z_L} + 1 + \frac{Z_R}{Z_L} \quad (4.46)$$

$$k_2 = \frac{V_S}{I_S Z_L} \left(1 + \frac{Z_R}{Z_L} \right) \quad (4.47)$$

$$k_3 = \frac{I_F}{I_S Z_L} \left(1 + \frac{Z_S + Z_R}{Z_L} \right). \quad (4.48)$$

A corrente I_F necessária no cálculo de k_3 é obtida através de parâmetros advindos da análise do sistema utilizando o princípio da superposição [66]. A expressão (4.45) pode então ser separada em partes real e imaginária, obtendo-se assim um sistema de duas equações e duas incógnitas: \bar{d} e R_F . Resolvendo esse sistema de equações não-lineares, consegue-se estimar a localização da falta com grande precisão. Note que diferentemente dos métodos baseados em fasores de um terminal apresentados até aqui, essa técnica não requer a adoção de suposição alguma (considerar I_F em fase com I_S ou adotar que o sistema seja homogêneo, por exemplo). No entanto, o seu desempenho é dependente do conhecimento preciso das impedâncias das fontes Z_S e Z_R . Novamente, o método é deduzido considerando uma falta trifásica. Para a localização de outros tipos de falta, a técnica utiliza os circuitos de seqüência e os componentes simétricos dos fasores de tensão e corrente medidos no terminal S da LT.

4.4.3 Efeito Resultante da Falta de Sincronismo Entre as Medidas Tomadas nos Dois Terminais de Uma Linha de Transmissão

Como mostra a Figura 4.1, os métodos baseados em fasores dos dois terminais podem ou não requerer sincronismo entre as medidas (fasores) efetuadas nos dois terminais da linha. Vamos considerar inicialmente que as medidas de tensão e corrente nos terminais S e R da LT são tomadas em relação à mesma base de tempo t . Nesse caso, as formas de onda de tensão e corrente nos terminais da linha são expressas por

$$v_S(t) = V_{SP} \cos(\omega t + \theta_{VS}) \quad (4.49)$$

$$i_S(t) = I_{SP} \cos(\omega t + \theta_{IS}) \quad (4.50)$$

$$v_R(t) = V_{RP} \cos(\omega t + \theta_{VR}) \quad (4.51)$$

$$i_R(t) = I_{RP} \cos(\omega t + \theta_{IR}) \quad (4.52)$$

onde V_{SP} , I_{SP} , V_{RP} e I_{RP} representam os valores de pico e θ_{VS} , θ_{IS} , θ_{VR} e θ_{IR} , as fases das respectivas grandezas. Como as bases de tempo utilizadas pelos instrumentos de medida dos terminais S e R são iguais, as fases θ_{VS} , θ_{IS} , θ_{VR} e θ_{IR} estão todas expressas em função da mesma referência angular. Assim,

$$\theta_{VR} - \theta_{VS} = \theta_{IR} - \theta_{IS} \quad (4.53)$$

corresponde à diferença angular existente entre as grandezas dos terminais S e R, parâmetro relacionado principalmente ao fluxo de potência ativa entre os terminais da LT.

Suponha agora que a base de tempo utilizada pelos medidores instalados no terminal S continue sendo t , mas que a base de tempo empregada pelos instrumentos do terminal R passe a ser $t + t_\delta$, onde t_δ representa a diferença temporal entre essas bases de tempo. Substituindo t por $t + t_\delta$ em (4.51), chega-se a

$$v_R(t) = V_{RP} \cos(\omega[t + t_\delta] + \theta_{VR}) = V_{RP} \cos(\omega t + \theta_{VR} + \omega t_\delta). \quad (4.54)$$

Considerando $\omega t_\delta = \delta$, conclui-se que

$$v_R(t) = V_{RP} \cos(\omega t + \theta_{VR} + \delta). \quad (4.55)$$

Resultado análogo é obtido para a expressão da corrente no terminal R. Assim, a diferença angular existente entre as grandezas dos dois terminais passa a ser

$$\theta_{VR} - \theta_{VS} + \delta \quad (4.56)$$

ou

$$\theta_{IR} - \theta_{IS} + \delta. \quad (4.57)$$

Portanto, o efeito da falta de sincronismo entre medidas é acrescentar um ângulo δ à diferença angular, dada por (4.53), que existe entre os fasores de tensão e corrente dos terminais S e R da LT, diferença essa definida pelo fluxo de potência na LT.

4.4.4 Princípio Básico dos Métodos Baseados em Fasores dos Dois Terminais

Como mostrado na Seção 4.4.2, os métodos baseados em fasores de um terminal exigem a adoção de aproximações para que possam fornecer uma estimativa de localização

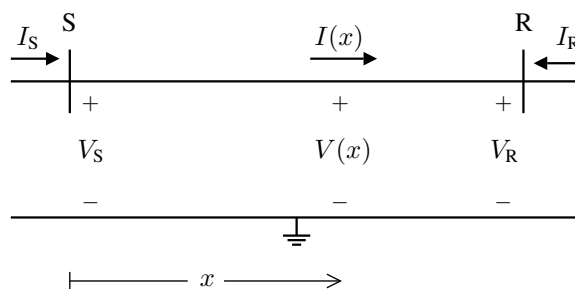


Figura 4.12: Linha de transmissão monofásica em regime permanente.

de falta. A única forma de evitar tais aproximações é através do conhecimento preciso das impedâncias das fontes Z_S e Z_R , o que não é trivial. Com o avanço da tecnologia, a comunicação entre subestações deixou de ser um desafio. Assim, métodos de localização baseados em fasores dos dois terminais tornaram-se viáveis. Dessa forma, as aproximações requeridas pela maioria dos métodos de um terminal não são mais necessárias, pois agora o número de equações disponíveis é consistente com a ordem do problema. Com isso, a resistência de falta, o efeito reatância, a posição da falta e as impedâncias das fontes praticamente não exercem influência no desempenho da maioria dos métodos de localização de dois terminais.

Para compreender o princípio básico de operação dos algoritmos que utilizam fasores dos dois terminais, considere uma LT monofásica e homogênea com parâmetros por unidade de comprimento conhecidos, como a mostrada na Figura 4.12. Assuma também que as medidas de tensão e corrente tomadas nos terminais local e remoto da linha são sincronizadas, o que resulta em fasores V_S e I_S em sincronismo com V_R e I_R . Utilizando um dos modelos matemáticos apresentados na Seção 2.3 para a LT, pode-se calcular a partir de V_S e I_S a tensão e a corrente em qualquer ponto dessa linha localizado a uma distância x do terminal local S. Tais grandezas também podem ser obtidas a partir de V_R e I_R , considerando que esse mesmo ponto está localizado a uma distância $\ell - x$ do terminal remoto R.

Considere agora a ocorrência de uma uma falta no ponto F da linha, como mostra a Figura 4.13, na qual as variáveis x e y representam as distâncias de um ponto qualquer em relação aos terminais S e R da linha, respectivamente. Nesse caso, pode-se admitir que a linha é dividida em duas LTs homogêneas, cujos parâmetros por unidade de comprimento são iguais aos da linha original SR:

- a LT SF, de comprimento d ;
- a LT RF, de comprimento $\ell - d$.

Apesar da falta ocorrida, a tensão e a corrente em qualquer ponto da linha localizado a uma distância $0 \leq x \leq d$ do terminal S ainda podem ser obtidas a partir de V_S e I_S . Do mesmo modo, a tensão e a corrente em qualquer ponto da linha localizado a uma distância

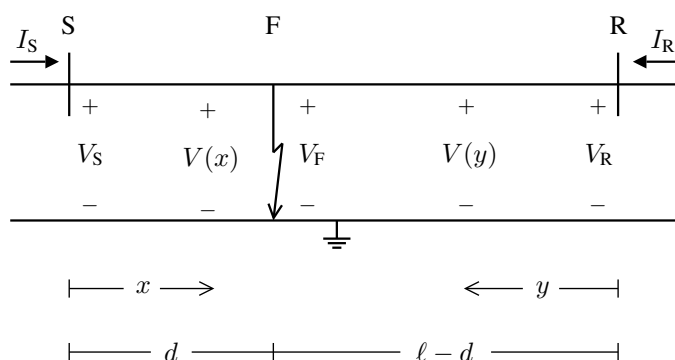


Figura 4.13: Linha de transmissão monofásica com falta no ponto F.

$0 \leq y \leq \ell - d$ do terminal R também podem ser determinadas a partir de V_R e I_R . Somente a tensão do ponto F (V_F), para o qual $x = d$ e $y = \ell - d$, pode ser obtida a partir dos fasores de ambos os terminais da LT. Portanto, pode-se afirmar que

$$V(x) \Big|_{x=d} = V(y) \Big|_{y=\ell-d}. \quad (4.58)$$

Essa é a expressão básica usada pela maioria dos métodos baseados em fasores dos dois terminais. Note que não há a necessidade de adoção de suposição alguma para a obtenção de (4.58), diferentemente do que ocorre com os métodos baseados em fasores de um terminal, que partem de (4.12), expressão na qual a resistência de falta é um parâmetro desconhecido.

4.4.5 Principais Métodos Baseados em Fasores dos Dois Terminais

Em [53] e [96], é apresentada uma técnica de localização de faltas baseada em fasores dos dois terminais bastante precisa: o método Johns/Jamali. Esse algoritmo, muito utilizado em localizadores de faltas comerciais, adota o modelo a parâmetros distribuídos apresentado na Seção 2.3 para representar a LT. A idéia dessa técnica é expressar a tensão no ponto F através de (2.17) tanto a partir dos fasores do terminal S quanto dos fasores do terminal R da LT. Igualando essas duas expressões, como feito em (4.58), e fazendo as devidas manipulações matemáticas, obtém-se

$$d = \frac{\operatorname{tgh}^{-1}(-B/A)}{\gamma} \quad (4.59)$$

onde

$$A = Z_c \cosh(\gamma\ell) I_R - \sinh(\gamma\ell) V_R + Z_c I_S \quad (4.60)$$

e

$$B = \cosh(\gamma\ell) V_R - Z_c \sinh(\gamma\ell) I_R - V_S. \quad (4.61)$$

O método é estendido para o caso trifásico através da utilização de uma transformação modal. O bom desempenho dessa abordagem se deve ao fato de ela utilizar um modelo a parâmetros distribuídos para a LT, por considerar o efeito da capacitância em derivação da linha e por não ser limitada a LTs transpostas. Entretanto, ela exige que as medidas dos dois terminais da linha sejam sincronizadas. As avaliações do método em questão realizadas em [53] mostram que um erro de sincronismo $\delta = \pm 10^\circ$ introduz um erro de localização de falta de até 1,5%. Como a modelagem utilizada pelo algoritmo proposto neste trabalho é idêntica à empregada em [53], esse algoritmo é explicado com mais detalhes na Seção 5.1 deste trabalho.

Outra técnica importante sobre localização de faltas baseada em fasores dos dois terminais é discutida em [31]. Tal abordagem considera que as medidas dos dois terminais podem ou não ser sincronizadas. Caso elas sejam não-sincronizadas, o erro de sincronismo δ é incluído como uma variável do problema. A LT é modelada através apenas da matriz impedância. Para a determinação do ponto de falta, o algoritmo emprega uma estimação de mínimos quadrados. Se as medidas são não-sincronizadas, o método passa a ser não-linear, o que aumenta o esforço computacional. Os resultados obtidos mostram erros variando entre 0 e 1,8%. O fato de desconsiderar a capacitância em derivação pode resultar em erros maiores nos casos de LTs longas ou de alta tensão. Além disso, a modelagem utilizada para a LT é a parâmetros concentrados, que não representa linhas longas de forma adequada (Seção 2.3).

Em [29], é apresentado um método baseado em medidas não-sincronizadas. O algoritmo emprega a decomposição em componentes simétricos e utiliza os circuitos de seqüência do modelo π a parâmetros concentrados. Para linhas longas, aplica-se uma compensação nos elementos do modelo para se trabalhar com parâmetros distribuídos. Semelhantemente ao que ocorre na abordagem apresentada em [53] e [96], se os fasores dos dois terminais da linha são sincronizados, é possível isolar a variável d manipulando as equações do modelo da linha. No caso de medidas não-sincronizadas, primeiramente busca-se determinar o valor do ângulo δ através da equação não-linear

$$a \sin \delta + b \cos \delta + c = 0 \quad (4.62)$$

onde a , b e c são funções dos fasores de tensão e corrente e também da reatância da linha. Com o auxílio do método de Newton-Raphson, determina-se δ e sincronizam-se os fasores dos dois terminais da linha. Feito isso, a localização da falta é dada por

$$d = \frac{\operatorname{Re}(V_{Sm}) \sin \delta + \operatorname{Im}(V_{Sm}) \cos \delta - \operatorname{Im}(V_{Rm}) + C_{4m}}{C_{1m} \sin \delta + C_{2m} \cos \delta + C_{4m}} \quad (4.63)$$

onde C_1 , C_2 e C_4 são também funções dos fasores de tensão e corrente e da reatância da linha. O índice m (0, 1 ou 2) indica o circuito de seqüência adotado no processo de localização de falta, uma vez que qualquer um dos circuitos de seqüência pode ser usado. O trabalho propõe utilizar o circuito de seqüência positiva, o que evita uma etapa de classificação do

tipo de falta. Além disso, o uso do circuito de seqüência zero deve ser evitado devido às incertezas acerca dos seus valores, uma vez que esses parâmetros são de difícil modelagem. Uma desvantagem desse método é a necessidade de determinar δ antes da estimação da posição da falta. Além de aumentar o esforço computacional, um erro nessa variável pode resultar em erro na estimativa da localização da falta.

Outra abordagem baseada em medidas não-sincronizadas é apresentada em [32]. Tal técnica também utiliza o princípio da superposição, considerando apenas fasores de tensão de pré-falta e de pós-falta. A modelagem empregada utiliza o modelo π da rede de falta de seqüência positiva (Seção 3.4). A estimação da localização da falta é obtida através de uma variável denominada fator de distância, definida por

$$k_v \triangleq \left| \frac{V_{S1}}{V_{R1}} \right| \quad (4.64)$$

onde V_{S1} e V_{R1} são as tensões de seqüência positiva dos terminais S e R da rede de falta. Essas tensões dependem de todas as impedâncias do modelo e da própria distância d . Como k_v é determinado através da magnitude do quociente entre duas tensões, o erro de sincronismo torna-se irrelevante nessa abordagem. A estimação da localização da falta é feita através da comparação entre os valores medidos e calculados de k_v . Uma vantagem desse algoritmo é ser imune a eventuais saturações dos TCs, uma vez que ele utiliza apenas medidas de tensão. Porém, como em alguns métodos de um terminal, o valor calculado de k_v depende do conhecimento de Z_S e Z_R , cuja modelagem é imprecisa [53]. Além disso, o método emprega uma modelagem a parâmetros concentrados para a LT.

Em [97] e [98], é apresentado um método de localização de faltas adaptativo que, diferentemente dos métodos vistos até aqui, propõe-se a operar em tempo real. Tal técnica apresenta três inovações: um algoritmo para estimação dos fasores de frequência fundamental baseado na transformada discreta de Fourier; um algoritmo para estimação dos parâmetros da LT (velocidade de propagação ν e impedância característica Z_c) baseado nos fasores de tensão e corrente dos terminais S e R da linha; o próprio algoritmo de localização do ponto de falta. A LT é modelada a parâmetros distribuídos e é usada a transformação de Clarke para a obtenção dos três modos de propagação. A modelagem empregada considera LTs transpostas e as medidas dos dois terminais precisam ser sincronizadas através da utilização de sistemas GPS. Como vantagem, esse método busca reduzir o erro causado por variações nos parâmetros da LT.

Em [33], outra abordagem baseada em medidas não-sincronizadas é proposta. O algoritmo também utiliza o conceito de fator de distância proposto em [32], definido por (4.64). Dessa forma, essa técnica também requer o conhecimento das impedâncias das fontes. A inovação do método parte do fato de que se apenas um dos TCs estiver saturado, pode-se utilizar a sua medida de corrente para estimar as magnitudes ou as fases de Z_S e Z_R ; as

fases ou as magnitudes dessas impedâncias devem ser arbitradas. Assim, busca-se reduzir a influência de erros nos valores adotados para Z_S e Z_R em relação à referência [32], na qual é necessário arbitrar tanto as fases quanto as magnitudes de Z_S e Z_R . Conforme mostrado no referido estudo, o ideal é arbitrar as fases das impedâncias das fontes, pois um erro nesse parâmetro gera um erro menor na estimativa da localização da falta (quando comparado com o erro da estimativa causado por desvios nas magnitudes de Z_S e Z_R). Uma desvantagem desse método é que ele também emprega um modelo para a LT a parâmetros concentrados.

4.4.6 Comentários a Respeito das Principais Fontes de Erro dos Métodos Baseados em Fasores de Frequência Fundamental

Como visto neste capítulo, existem diversas fontes de erro (FEs) que podem afetar o desempenho dos métodos baseados em fasores de frequência fundamental. Agora que os principais métodos dessa classe propostos na literatura foram apresentados, pode-se fazer um resumo das suas principais FEs, sempre buscando comparar os métodos baseados em fasores de um terminal com os que utilizam fasores dos dois terminais. A literatura apresenta alguns trabalhos dedicados ao estudo dessas FEs, tais como as referências [37], [42], [94], [99] e [100].

A resistência de falta é a principal FE dos métodos baseados em fasores de um terminal. A fim de eliminar o efeito desse parâmetro de valor desconhecido, os algoritmos de um terminal requerem a adoção de suposições, ficando sujeitos ao efeito reatância nos casos em que tais aproximações não correspondem à realidade, que depende ainda da posição da falta e das impedâncias da linha e das fontes. A única possibilidade de evitar erros devido ao efeito reatância é utilizar os valores precisos das impedâncias das fontes. Ainda assim, os métodos de um terminal podem apresentar erros, pois os valores de Z_S e Z_R variam de acordo com a configuração do sistema de potência devido à interligação dos sistemas de transmissão. No caso dos métodos baseados em fasores dos dois terminais, a maioria não depende dos valores dessas impedâncias. Os que utilizam tal informação também são sujeitos a erros devido às variações de Z_S e Z_R .

Outro aspecto que influencia sobremaneira o desempenho de um método de localização baseado em fasores é a modelagem utilizada para a LT. Primeiramente, vamos considerar a utilização ou não da capacitância em derivação na modelagem da LT. Com exceção das técnicas apresentadas em [63], [64] e [66], os métodos de localização baseados em fasores de um terminal estudados utilizam apenas a impedância série na modelagem da LT. Como mostrado na Seção 2.3, a capacitância em derivação deve ser levada em consideração na análise de LTs médias e longas, especialmente nos casos de linhas de alta tensão de transmissão. No caso dos métodos de dois terminais, a maioria considera esse parâmetro na modelagem da linha. Outro aspecto importante é a adoção ou não de um modelo para a linha a parâme-

Tabela 4.4: Parâmetros de seqüência positiva e zero das linhas de transmissão simuladas

Parâmetro	Seqüência positiva	Seqüência zero
R_u (m Ω /km)	17,4	288
L_u (mH/km)	0,895	3,13
C_u (nF/km)	33,6	21,6

Tabela 4.5: Demais parâmetros das simulações realizadas

Parâmetro	Linha com $\ell = 100$ km	Linha com $\ell = 300$ km
E_S (kV)	$500e^{j0}$	$500e^{j0}$
E_R (kV)	$500e^{-j10^\circ}$	$500e^{-j10^\circ}$
C_{L1} (μ F)	3,36	10,08
Z_{S1} (Ω)	$0,5156 + j10 = 0,3378e^{j87,04^\circ}$	$0,5156 + j10 = 0,3378e^{j87,04^\circ}$
Z_{R1} (Ω)	$1,0313 + j20 = 20,03e^{j87,04^\circ}$	$1,0313 + j20 = 20,03e^{j87,04^\circ}$
Z_{L1} (Ω)	$1,74 + j33,74 = 33,78e^{j87,04^\circ}$	$5,22 + j101,22 = 101,34e^{j87,04^\circ}$
β	0	0

tros distribuídos. Novamente, com exceção das técnicas apresentadas em [63] e [64], todos os demais métodos de um terminal estudados utilizam modelos a parâmetros concentrados para a linha, o que não é adequado para LTs longas. No caso dos métodos de dois terminais, algumas abordagens usam modelos a parâmetros distribuídos para a linha. Para verificar a influência da modelagem da linha nos métodos baseados em fasores de um terminal, utiliza-se o método dado por (4.43) (proposto por Takagi em [65]) para a localização de faltas em duas linhas de 500 kV simuladas no ATP, com comprimentos $\ell = 100$ km e $\ell = 300$ km e parâmetros por unidade de comprimentos (de seqüências positiva e zero) retirados de [51], mostrados na Tabela 4.4. Os demais dados das simulações são apresentados na Tabela 4.5. São simuladas somente faltas sólidas do tipo trifásica, com localizações $0 \leq \bar{d} \leq 1$ e passo de 0,1. As impedâncias de seqüência positiva das fontes (Z_S e Z_R) são definidas de modo a tornar as suas fases iguais à fase de Z_{L1} . Como pode-se verificar através de (3.27), tal característica torna nula a fase β do fator de distribuição de corrente d_s , independentemente da posição \bar{d} da falta (sistema homogêneo). Como essa situação representa a condição ideal para o método aqui utilizado, a única FE que afeta o desempenho do método é a modelagem matemática adotada para a LT, que é a parâmetros concentrados e que não considera o efeito da capacitância em derivação da linha. A Figura 4.14 apresenta os resultados obtidos. Pode-se notar que o erro de localização de falta varia desde zero, para faltas localizadas no terminal S da linha, até um valor máximo, para faltas localizadas no terminal remoto da LT. O método de localização aplicado à linha mais curta leva a erros menores, pois um modelo a parâmetros concentrados ainda caracteriza essa linha de forma adequada e também porque

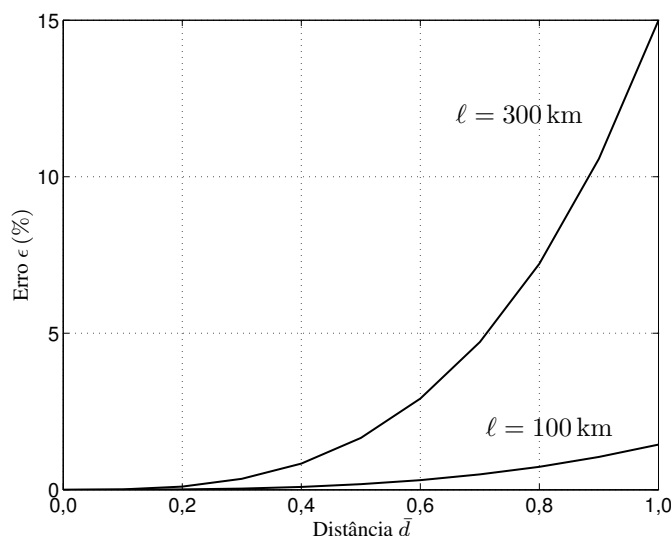


Figura 4.14: Influência da modelagem matemática da linha de transmissão no erro da estimativa de localização de falta fornecida pela expressão (4.43).

ela possui uma capacitância em derivação total três vezes menor do que a linha de 300 km (C_{L1} , ver Tabela 4.5). Pode-se verificar que no caso da linha de 300 km, o erro de localização de uma falta no final da linha atinge um valor bastante elevado, aproximadamente 15%. Aplicando o método proposto em [53], baseado em dados dos dois terminais e que utiliza uma modelagem da LT a parâmetros distribuídos, para a localização dessas mesmas faltas, o erro de localização de falta é desprezável. Além da capacitância em derivação e do uso ou não de modelos a parâmetros distribuídos, outro aspecto relacionado com a modelagem de uma LT que pode afetar o desempenho de qualquer método baseado em fasores ocorre quando uma LT real não é perfeitamente homogênea. Tal fato só é relevante para o caso de LTs muito longas.

Outra possível FE dos métodos baseados em fasores é a assimetria da LT. Métodos que usam a decomposição em componentes simétricos para o desacoplamento dos fasores só são válidos para LTs transpostas (ver Apêndice A). Para LTs não-transpostas, deve-se utilizar uma modelagem que inclua as impedâncias mútuas da LT. Outra possibilidade é considerar o uso da transformação de Clarke, caso a LT apresente um eixo de simetria vertical.

Alguns métodos de localização baseados em fasores de um terminal necessitam de uma etapa de classificação do tipo de falta, o que pode causar um erro caso essa etapa falhe. Como visto na Seção 4.4.2, os métodos propostos em [63], [64] e [65] requerem tal classificação. Além desses, a localização de faltas utilizando as expressões apresentadas na Tabela 4.1 também exige tal etapa de classificação. Já os métodos baseados em fasores dos dois terminais estudados neste trabalho são imunes a essa FE.

Uma FE exclusiva dos métodos baseados em fasores dos dois terminais são possíveis erros de sincronismo entre medidas. Naturalmente, métodos baseados em fasores sin-

cronizados são sensíveis a essa FE. Já os métodos baseados em fasores não-sincronizados são imunes a esse efeito. Entretanto, caso o método necessite determinar o ângulo δ antes da etapa de estimação da localização da falta, o seu desempenho pode ser prejudicado caso ocorra um erro na determinação desse ângulo, que é definido a partir de fasores medidos de tensão e corrente.

O desempenho de um método baseado em fasores pode ser inadequado para a localização de faltas em LTs com compensação série, que consiste na instalação de bancos de capacitores em série com as fases de uma LT de EAT (Figura 4.15) a fim de reduzir a sua relação X/R (que aumenta com o nível de tensão de transmissão, ver Tabela 2.4), aumentando assim a ampacidade⁸ da linha. Considerando que a LT apresente uma reatância série $X = \omega L$ e o capacitor série, uma reatância $X_C = -1/\omega C_s$, a reatância série total de uma LT com compensação série passa a ser $X + X_C$. O grau de compensação utilizado pode ser definido como a razão entre as reatâncias X_C e X . Assim,

$$K \triangleq -\frac{X_C}{X} \times 100 \quad (4.65)$$

cujos valores típicos situam-se na faixa entre 20 e 70 % [11]. De acordo com [101], a compensação série em uma LT permite ainda os seguintes benefícios:

- melhora a estabilidade transiente e em regime permanente do sistema de potência;
- melhora a divisão de carga em circuitos paralelos;
- reduz a queda de tensão em regiões próximas a cargas durante perturbações severas;
- reduz as perdas na transmissão de energia elétrica;
- melhora o ajuste das cargas da linha.

Em linhas que apresentam esse tipo de compensação, dois tipos de perturbação podem afetar o desempenho de um método de localização de faltas baseado em fasores, uma em regime permanente e outra de natureza transitória. Em regime permanente, os fasores de tensão no terminal S (V_S) são alterados pela existência de compensação série na linha (os fasores de corrente no terminal S não são afetados, uma vez que a compensação está em série com a linha). Assim, o localizador instalado da forma mostrada na Figura 4.15(a) é influenciado por essa FE pois, como visto anteriormente, a capacitância C_s não é incluída nas modelagens matemáticas de LTs. Entretanto, pode-se considerar a existência de uma barra fictícia S' cuja tensão $V_{S'}$ não é afetada pela compensação série da LT. Sendo assim, para solucionar tal problema basta instalar o localizador de faltas após a compensação série da LT, como mostra a Figura 4.15(b). Já o efeito causado pela perturbação transitória é de mais difícil

⁸Termo relacionado com a capacidade de uma LT (ou de um condutor em geral) de transportar corrente elétrica (amperes) em uma determinada situação.

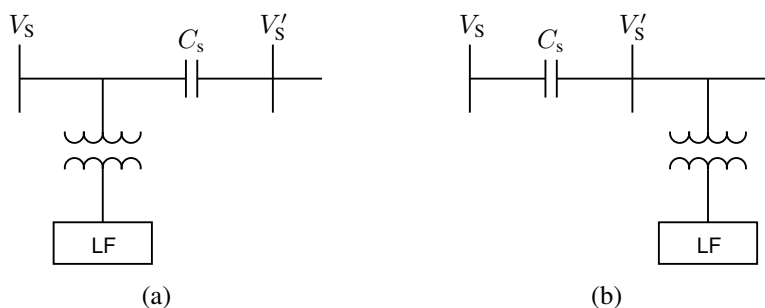


Figura 4.15: Posição do localizador de falta (LF) em relação à etapa de compensação série de uma linha de transmissão. (a) Localizador de falta instalado antes da compensação série da linha. (b) Localizador de falta instalado após a compensação série da linha.

solução. A ocorrência de uma falta resulta no aparecimento de uma oscilação conhecida como ressonância subsíncrona [13], cuja frequência natural é determinada pela indutância L da linha e pela capacitância C_s da compensação série. Assim,

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}}. \quad (4.66)$$

Como $X = \omega L$ e $X_C = -1/\omega C_s$, essa frequência de oscilação pode ser reescrita como

$$f_o = f \sqrt{\frac{X_C}{X}} = f \sqrt{\frac{K}{100}} \quad (4.67)$$

onde f é a frequência de operação do sistema de potência. Essa oscilação de frequência f_o decai com o tempo, mas em geral não se extingue dentro do tempo de atuação da proteção da LT. Além disso, como $K < 100\%$ em (4.67) ($X_C < X$), a frequência de oscilação f_o é menor do que a frequência de operação f do sistema de potência, o que torna difícil a filtragem desse sinal transitório. Conseqüentemente, os sinais medidos no terminal local da LT não chegam a atingir o regime permanente, o que resulta em erros na determinação dos fasores de pós-falta do terminal S da linha. Essa FE afeta os métodos de localização baseados na impedância aparente vista pelo terminal S da LT (métodos de um terminal apresentados anteriormente) e também os métodos que utilizam fasores de corrente no processo de estimação da localização da falta [30].

Algumas FEs afetam qualquer método baseado em fasores, independentemente se a técnica utiliza dados de um ou dos dois terminais da linha. Por ser o dado de entrada dessa classe de algoritmos, fasores incorretos (magnitude e/ou fase) naturalmente conduzem a erros na estimativa de localização de falta. Esses erros nos fasores podem ser causados tanto pelo algoritmo de extração dos fasores utilizado quanto por erros nas medidas de tensão e corrente (causados pelos instrumentos de medição e pelos TPs e TCs). Outro aspecto importante para o bom desempenho de um algoritmo baseado em fasores são parâmetros da LT corretos: R_u , L_u e C_u bem como o comprimento ℓ da linha.

4.5 Conclusões

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica dos métodos de localização de faltas propostos na literatura. Conforme mostrado, as técnicas de localização podem ser divididas em três grandes grupos: métodos de localização de faltas baseados em fasores de frequência fundamental, métodos de localização de faltas baseados em transitórios de alta frequência e métodos de localização de faltas baseados no conhecimento. Dessas três categorias, a primeira recebeu o maior esforço de pesquisa, por se tratar da classe a qual pertence o método de localização de faltas desenvolvido neste trabalho. Além disso, as principais fontes de erros que podem afetar negativamente o desempenho de um método de localização de faltas foram discutidas.

Capítulo 5

Método de Localização de Faltas

O objetivo deste capítulo é descrever de forma detalhada o método de localização de faltas proposto neste trabalho. Primeiramente, a Seção 5.1 apresenta o princípio básico de localização de faltas em LTs monofásicas empregado pelo método desenvolvido bem como a estratégia utilizada para evitar a necessidade de sincronismo entre as medições efetuadas nos dois terminais da LT. A Seção 5.2 mostra como é possível estender a abordagem considerada na Seção 5.1 para o caso de LTs trifásicas. A Seção 5.3 apresenta o modelo de um sistema de potência que opera sob uma condição de falta adotada como padrão neste trabalho, o que facilita a definição das condições de falta consideradas nos testes experimentais apresentados ao longo deste e do próximo capítulo. Além disso, ela descreve as condições de simulação desse modelo de sistema de potência no ATP. A Seção 5.4 mostra como a característica de variação quase linear da magnitude da tensão ao longo de uma LT pode ser usada no desenvolvimento de um método de localização de faltas iterativo independente de sincronismo entre medidas. A Seção 5.5 apresenta passo a passo o método de localização de faltas proposto, através da localização da falta padrão definida na Seção 5.3. A Seção 5.6 apresenta uma situação incomum em que o algoritmo em questão pode convergir para uma solução incorreta. A fim de reduzir a probabilidade de ocorrência desse efeito indesejável, uma técnica é desenvolvida e apresentada naquela seção. A Seção 5.7 apresenta o método de localização de faltas proposto descrito na forma de um fluxograma. Por fim, a Seção 5.8 apresenta as conclusões deste capítulo.

5.1 Princípio Básico do Método Proposto

Considere uma LT monofásica e homogênea cujos parâmetros por unidade de comprimento R_u , L_u e C_u são conhecidos¹, como a ilustrada na Figura 5.1. Para representar o comportamento dessa linha, deve-se adotar uma das modelagens matemáticas apresentadas

¹Como discutido na Seção 2.1, a condutância em derivação da LT é desconsiderada neste trabalho.

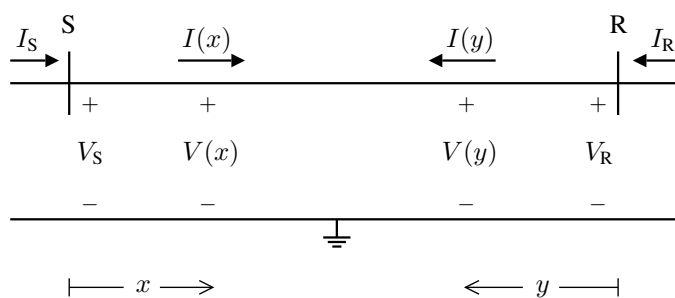


Figura 5.1: Linha de transmissão monofásica sem falta.

na Seção 2.3. Como já explicado, o ideal é utilizar uma modelagem a parâmetros distribuídos, uma vez que as LTs de um sistema de potência podem apresentar grandes comprimentos. Além disso, uma modelagem dessa natureza representa de forma confiável o efeito da capacitância em derivação da linha. Por esses motivos, a LT é representada neste trabalho através da modelagem matemática a parâmetros distribuídos definida por (2.17) e (2.18). Sendo assim, conhecidos os fasores V_S e I_S , os fasores de tensão e corrente em qualquer ponto da LT localizado a uma distância $0 \leq x \leq \ell$ do seu terminal local podem ser obtidos por

$$V(x) = V_S \cosh(\gamma x) - I_S Z_c \sinh(\gamma x) \quad (5.1)$$

e

$$I(x) = I_S \cosh(\gamma x) - \frac{V_S}{Z_c} \sinh(\gamma x) \quad (5.2)$$

onde γ é a constante de propagação da LT e Z_c é a impedância característica da LT, grandezas definidas por (2.19) e (2.20), respectivamente. De maneira análoga, conhecidos os fasores V_R e I_R , os fasores de tensão e corrente em qualquer ponto da linha localizado a uma distância $0 \leq y \leq \ell$ do seu terminal remoto são dados por

$$V(y) = V_R \cosh(\gamma y) - I_R Z_c \sinh(\gamma y) \quad (5.3)$$

e

$$I(y) = I_R \cosh(\gamma y) - \frac{V_R}{Z_c} \sinh(\gamma y). \quad (5.4)$$

Note que como a LT está operando em uma condição normal (sem falta), os fasores de tensão e corrente em qualquer ponto dessa linha podem ser obtidos tanto através de (5.1) e (5.2) quanto por (5.3) e (5.4). No entanto, tal fato só é verdadeiro caso V_S e I_S estejam em sincronismo com V_R e I_R .

Considere agora que a LT da Figura 5.1 tenha sofrido uma falta no ponto F, localizado a uma distância $x = d$ do seu terminal local, como mostra a Figura 5.2. Nesse caso, pode-se considerar que a linha fica dividida em duas LTs cujos parâmetros por unidade de

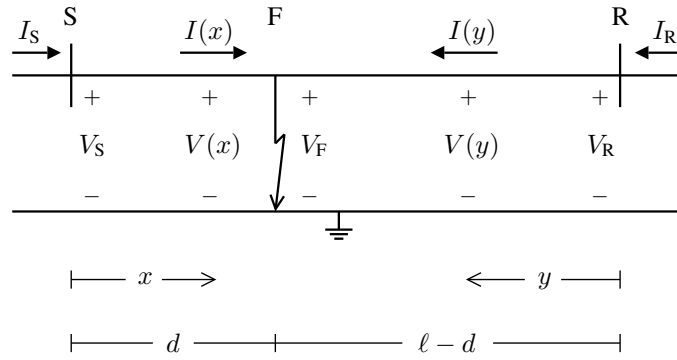


Figura 5.2: Linha de transmissão monofásica com falta no ponto F.

comprimento são iguais aos da LT original SR [29], [83], [84], [97]:

- a LT SF, de comprimento d ;
- a LT RF, de comprimento $\ell - d$.

Assim, apesar da existência de uma falta no ponto F, os fasores de tensão e corrente em qualquer ponto da LT localizado a uma distância $0 \leq x \leq d$ do seu terminal local ainda podem ser obtidos a partir de V_S e I_S através de (5.1) e (5.2), respectivamente. De maneira análoga, os fasores de tensão e corrente em qualquer ponto da LT localizado a uma distância $0 \leq y \leq \ell - d$ do seu terminal remoto podem ser determinados a partir de V_R e I_R através de (5.3) e (5.4), respectivamente.

Seguindo o princípio básico dos métodos de localização de faltas baseados em fasores dos dois terminais apresentado na Seção 4.4.4, pode-se afirmar que se as medidas de tensão e corrente tomadas nos dois terminais da linha sob falta estiverem sincronizadas, o fasor de tensão no ponto F (V_F), para o qual $x = d$ e $y = \ell - d$ (ver Figura 5.2), pode ser obtido tanto através dos fasores V_S e I_S quanto através dos fasores V_R e I_R . Sendo assim, pode-se considerar

$$V(x)\Big|_{x=d} = V(y)\Big|_{y=\ell-d}. \quad (5.5)$$

Substituindo (5.1) e (5.3) em (5.5) e efetuando as devidas manipulações matemáticas, conclui-se que a distância da falta em relação ao terminal local da linha é dada por

$$d = \frac{\operatorname{tgh}^{-1}(-B/A)}{\gamma} \quad (5.6)$$

onde

$$A = Z_c \cosh(\gamma\ell)I_R - \sinh(\gamma\ell)V_R + Z_c I_S \quad (5.7)$$

e

$$B = \cosh(\gamma\ell)V_R - Z_c \sinh(\gamma\ell)I_R - V_S. \quad (5.8)$$

Esse é o resultado obtido pelo método de localização de faltas proposto por Johns e Jamali [53], [96], que já havia sido apresentado sucintamente no início da Seção 4.4.5. Essa abordagem apresenta um resultado bastante preciso por adotar uma modelagem matemática a parâmetros distribuídos para a LT e também por não assumir suposição alguma para a definição de (5.6). Entretanto, a técnica requer sincronização de medidas para operar adequadamente. Uma característica importante de método de Johns/Jamali é que erros nos fasores e nos parâmetros da LT, por exemplo, conduzem a uma estimativa complexa. Nesse caso, considera-se apenas a parte real de (5.6) como estimativa de localização de falta [53].

Como demonstrado na Seção 4.4.3, o uso de bases de tempo diferentes para os instrumentos de medida instalados nos dois terminais da LT, cuja diferença temporal é aqui chamada t_δ , resulta em uma falta de sincronismo entre as medidas de tensão e corrente efetuadas nesses dois terminais. Considerando que o sistema de potência apresentado na Figura 5.2 seja invariante no tempo², a diferença t_δ causa uma defasagem no tempo entre as formas de onda das tensões no ponto F calculadas a partir dos fasores dos terminais S e R da linha, cujo valor também é t_δ . A fim de ilustrar tal efeito, a Figura 5.3 apresenta as formas de onda de tensão em função do tempo no ponto F de uma linha sob condição de falta, cujas magnitudes e fases são determinadas a partir de (5.1) e (5.3). Como mostra tal figura, as magnitudes dessas tensões sinusoidais são idênticas. A defasagem temporal existente entre as formas de onda está associada à diferença temporal t_δ existente entre as bases de tempo utilizadas pelos medidores de tensão e corrente instalados nos dois terminais da linha. Neste exemplo, o valor dessa defasagem é $t_\delta = 2,08$ ms, o que corresponde a um ângulo de defasagem $\delta = 45^\circ$, considerando que o sistema opera com $f = 60$ Hz.

No domínio da frequência, o efeito da falta de sincronismo entre medidas é acrescentar o ângulo δ à fase do fasor do lado direito de (5.5), considerando que o fasor V_S seja utilizado como referência angular; as magnitudes dos fasores dos lados esquerdo e direito de (5.5) continuam sendo iguais. Com base nessa característica, este trabalho propõe utilizar apenas as magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ em (5.5) a fim de suplantiar a necessidade de sincronismo entre as medidas tomadas nos dois terminais da LT. Nesse caso, assume-se que

$$|V(x)|_{x=d} = |V(y)|_{y=\ell-d}. \quad (5.9)$$

Substituindo (5.1) e (5.3) em (5.9), obtém-se

$$|V_S \cosh(\gamma d) - I_S Z_c \sinh(\gamma d)| = |V_R \cosh[\gamma(\ell - d)] - I_R Z_c \sinh[\gamma(\ell - d)]|. \quad (5.10)$$

A expressão (5.10) representa o princípio básico de operação do método de localização de

²O que constitui uma aproximação, uma vez que fatores como temperatura, manutenções e envelhecimento alteram as características de qualquer sistema de potência ao longo do tempo. Entretanto, para um intervalo de tempo pequeno como t_δ , tal suposição é aceitável.

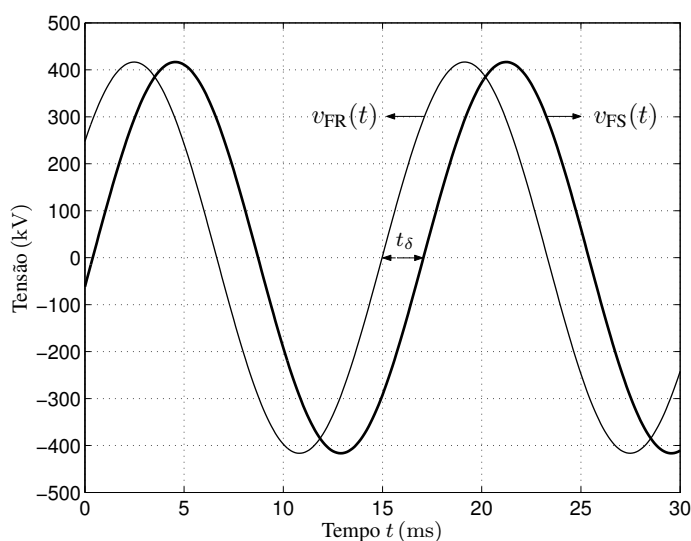


Figura 5.3: Formas de onda de tensão no ponto F calculadas a partir das medidas dos terminais S [$v_{FS}(t)$] e R [$v_{FR}(t)$] da linha de transmissão.

faltas em LTs proposto neste trabalho. Note que ela é independente do ângulo de defasagem δ , o que permite estimar a localização de faltas mesmo no caso de fasores dos terminais S e R da linha não-sincronizados. A maneira como o valor da distância d é determinado é apresentada em detalhes na Seção 5.5.

5.2 Extensão Para o Caso Trifásico

A expressão (5.9), assim como a sua versão original (5.5), são adequadas para a localização de faltas em LTs monofásicas. Para o caso de LTs trifásicas, deve-se utilizar previamente uma transformação modal ou a decomposição em componentes simétricos a fim de permitir a caracterização da LT faltosa através de circuitos monofásicos magneticamente desacoplados. Feito isso, pode-se adotar um dos modos resultantes da transformação modal ou um dos circuitos de seqüência resultante da decomposição em componentes simétricos e utilizar em (5.1) e (5.3) as grandezas V_{Sm} , I_{Sm} , V_{Rm} , I_{Rm} , γ_m e Z_{cm} , lembrando que o índice m representa o modo ou seqüência escolhida. Assim, de maneira análoga a (5.9), a localização da falta d é definida a partir da seguinte relação:

$$|V_m(x)|_{x=d} = |V_m(y)|_{y=\ell-d}. \quad (5.11)$$

Qualquer modo ou seqüência pode ser aplicado em (5.11) para a localização de uma falta ($m = 0, 1$ ou 2). Apesar disso, o uso dos componentes de modo zero ou de seqüência zero deve ser evitado devido às incertezas acerca dos valores da constante de

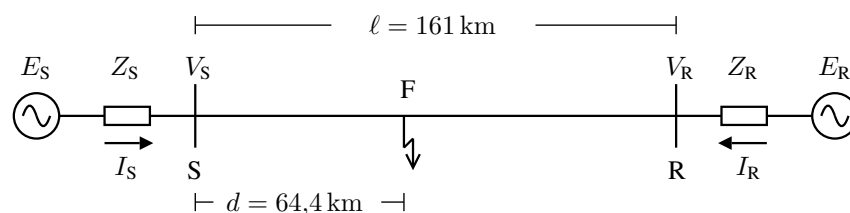


Figura 5.4: Sistema de potência sob condição de falta definida como padrão.

propagação γ_0 e da impedância característica Z_{c0} . No caso de se utilizar a decomposição em componentes simétricos para a localização de uma falta, a melhor opção é adotar $m = 1$, o que torna desnecessária uma etapa de classificação do tipo de falta, pois, diferentemente dos componentes de seqüências negativa e zero, os fasores de um sistema de potência sempre possuem componentes de seqüência positiva, independentemente do tipo de falta ocorrida na LT. Como já mencionado, a decomposição em componentes simétricos só gera circuitos de seqüência desacoplados nos casos em que a LT é transposta [53]. Sendo assim, uma alternativa adequada é empregar a transformação de Clarke, o que permite aplicar o método de localização de faltas proposto também para o caso de LTs não-transpostas que apresentem um eixo de simetria vertical [102] (ver Apêndice A).

Apesar de o índice m presente em (5.11) ser necessário para informar a seqüência ou modo utilizado no processo de estimação da localização de uma falta, ele é omitido deste ponto em diante a fim de simplificar a notação das variáveis. Sendo assim, assume-se que sempre se utiliza $m = 1$ em (5.11), que representa seqüência positiva no caso de se utilizar a decomposição em componentes simétricos ou modo aéreo 1 caso se empregue uma transformação modal.

Como visto até agora, a técnica desenvolvida neste trabalho utiliza os fasores de pós-falta de tensão e corrente dos terminais S e R da linha. Logo, apesar de as medidas dos dois terminais da linha poderem ser não-sincronizadas, o instante de ocorrência da falta deve ser detectado pelos instrumentos de medida de ambos os terminais para que se possa então determinar esses fasores de pós-falta.

5.3 Sistema de Potência Sob Condição de Falta Padrão

Para que se possa definir com mais facilidade as condições de falta adotadas nos diversos testes experimentais apresentados ao longo deste e do próximo capítulo, é interessante arbitrar uma condição de falta considerada como padrão para um sistema de potência que apresente uma configuração igual à mostrada na Figura 2.1. Para tal, assume-se que o padrão de falta deste ponto em diante ocorre no sistema de potência ilustrado através do diagrama unifilar da Figura 5.4, composto por uma LT transposta de 500 kV que sofre uma falta

Tabela 5.1: Parâmetros do sistema de potência sob condição de falta padrão

Parâmetro	Valor
Comprimento ℓ	161 km
Distância d	64,4 km
Distância \bar{d}	0,4
Tipo de falta	Fase-terra
Resistência R_F	10 Ω
Tensão E_S	500e ^{j0} kV
Tensão E_R	500e ^{-j10°} kV
Impedância Z_S	j10 Ω
Impedância Z_R	j20 Ω
Frequência f	60 Hz
Ângulo δ	45°
Resistência R_{u1}	0,0255 Ω /km
Indutância L_{u1}	0,87 mH/km
Capacitância C_{u1}	0,0129 μ F/km
Resistência R_{u0}	0,279 Ω /km
Indutância L_{u0}	3,33 mH/km
Capacitância C_{u0}	0,00702 μ F/km

fase-terra, uma vez que esse é o tipo de falta de maior incidência em sistemas de potência (ver Tabela 1.2). Todos os parâmetros desse sistema de potência sob condição de falta padrão estão descritos na Tabela 5.4. A LT considerada é baseada no modelo 1 adotado em [80]. A falta ocorrida possui uma resistência de falta $R_F = 10 \Omega$ e está localizada a uma distância $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$) do terminal local da LT. A diferença angular de 10° entre as tensões das fontes E_S e E_R é a mesma utilizada em [29]. Por simplicidade, as impedâncias Z_S e Z_R das fontes E_S e E_R são arbitradas puramente indutivas devido ao alto nível de tensão do sistema de potência em questão. Tal suposição não implica em perda de generalidade, pois como o método de localização de faltas proposto é baseado em (5.9), que é independente de Z_S e Z_R , tais impedâncias não exercem qualquer influência sobre o seu desempenho.

Informar ao longo deste trabalho que o sistema de potência está operando na condição de falta padrão significa dizer que os parâmetros da simulação realizada com o auxílio do *software* ATP são iguais aos apresentados na Tabela 5.1. Caso seja especificado, por exemplo, que o sistema de potência está sob uma condição de falta com $R_F = 20 \Omega$, todos os parâmetros de simulação são iguais aos apresentados nesta seção, exceto a resistência de falta, que vale 20Ω em vez de 10Ω .

Um ponto importante está relacionado ao tipo de simulação realizada com o ATP. O sistema de potência da Figura 5.4 é sempre simulado considerando operação em regime permanente, procedimento também adotado em outros trabalhos da área tais como [29] e [53], e utilizam-se os fasores V_S , I_S , V_R e I_R estimados pelo próprio ATP como dado de entrada do método de localização de faltas proposto. O objetivo desse procedimento é evitar o surgimento de transitórios eletromagnéticos, transitórios devido à reação de armadura das máquinas síncronas e componentes exponenciais CC nas medidas efetuadas nos dois terminais da linha, que se não forem tratados adequadamente conduzem a erros na determinação dos fasores V_S , I_S , V_R e I_R ³. Desse modo, pode-se avaliar exclusivamente o desempenho da técnica desenvolvida, pois em uma situação como essa em que tanto os fasores dos terminais S e R quanto os parâmetros da LT não apresentam erros, qualquer erro de localização de falta nos experimentos realizados ao longo deste trabalho pode ser atribuído quase que exclusivamente à técnica proposta. Logo, os testes realizados permitem verificar se um método de localização de faltas baseado apenas nas magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ é robusto para as diferentes condições de falta que podem ocorrer em um sistema de potência real. Além disso, também deseja-se avaliar se um erro de sincronismo realmente não afeta o desempenho do método proposto. Para isso, um ângulo $\delta = 45^\circ$ é adicionado às fases dos fasores do terminal R, mesmo valor adotado em [29].

5.4 Característica da Tensão ao Longo de Uma Linha de Transmissão

Diferentemente do que ocorre em (5.5), é impossível explicitar a variável d em (5.10) de forma analítica. Logo, a localização de uma falta através de (5.10) só pode ser feita caso se empregue alguma técnica numérica. Esse processo de localização de uma falta pode ser feito através de um método de otimização baseado na minimização de uma função custo, que pode ser definida, por exemplo, como

$$f(x) = ||V(x)| - |V(y)|| \quad (5.12)$$

lembrando que se deve considerar $y = \ell - x$. Como ponto de partida desse processo numérico, seria razoável assumir que a falta localiza-se no meio da linha ($x_0 = \ell/2$).

Dois pontos importantes a respeito do uso de técnicas tradicionais de otimização na localização de faltas com base apenas nas magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ devem ser observados. O primeiro é que um algoritmo de otimização pode requerer um alto esforço computacional. Além disso, muitos métodos numéricos, tal como o método de Newton-

³O estudo das técnicas de determinação dos fasores de frequência fundamental em LTs faltosas foge ao escopo deste trabalho.

Raphson, necessitam das expressões das derivadas das funções envolvidas no processo, no caso $|V(x)|$ e $|V(y)|$, que não são triviais. Outro ponto relevante é que como um algoritmo de otimização tradicional não é desenvolvido especificamente para a localização de faltas em LTs, ele pode estar sujeito a erros de convergência em certas condições de falta que resultem em mais de uma solução para (5.10) pertencentes à faixa $0 \leq x \leq \ell$, dependendo do valor inicial adotado no processo. Essas situações de risco são discutidas na Seção 5.6 e também ao longo do Capítulo 6. Sendo assim, é necessário implementar uma etapa adicional de teste da solução encontrada. Caso a estimativa obtida não satisfaça certos requisitos, o algoritmo deve ser executado novamente considerando um valor inicial diferente. Esse processo deve ser repetido até o momento em que se obtenha uma estimativa de localização de falta que satisfaça aos requisitos especificados, o que resulta, naturalmente, em um acréscimo na complexidade computacional do processo de localização de uma falta. Além disso, como mostra a Seção 5.6, a definição desses requisitos de teste não é trivial para a condição específica de falta trifásica não-sólida.

Entretanto, as funções $V(x)$ e $V(y)$ apresentam uma característica particular que permite desenvolver um algoritmo que não seja baseado em um processo de otimização tradicional: as suas magnitudes calculadas ao longo das LTs SF e RF da Figura 5.2 decaem de maneira quase linear com o aumento das distâncias x e y , respectivamente, o que permite que tais funções sejam aproximadas por retas de maneira bastante satisfatória. Para ilustrar tal fato, o sistema de potência mostrado na Figura 5.4, que está sob a condição de falta padrão, é simulado com o auxílio do ATP. A partir dos fasores V_S , I_S , V_R e I_R fornecidos pelo próprio ATP, determinam-se os seus componentes de seqüência positiva e utilizam-se (5.1) e (5.3) para determinar $V(x)$ e $V(y)$, respectivamente, ao longo de toda a LT. As magnitudes dessas funções são apresentadas no gráfico da Figura 5.5, no qual o eixo das abscissas representa a distância x ; a variável y é dada por $\ell - x$. Pode-se notar que essas duas curvas são realmente bastante próximas de retas, confirmando a característica mencionada anteriormente. Vale lembrar que na realidade as funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ só são válidas na Figura 5.5 até o ponto de falta F, cuja localização é definida pelo cruzamento entre as duas curvas. Neste exemplo, tal ponto corresponde a $x = 64,4$ km e $y = 96,6$ km ($161 - 64,4$). Apesar disso, é importante ressaltar que, na maioria dos casos estudados, as características dessas curvas calculadas ao longo de toda a LT não se alteram significativamente quando esses limites são extrapolados. Tal característica é fundamental para que a técnica desenvolvida funcione de maneira adequada.

5.5 Descrição do Método de Localização de Faltas Proposto

Para facilitar a descrição do método de localização de faltas proposto, vamos apresentar o seu princípio de funcionamento através da localização da falta padrão definida na

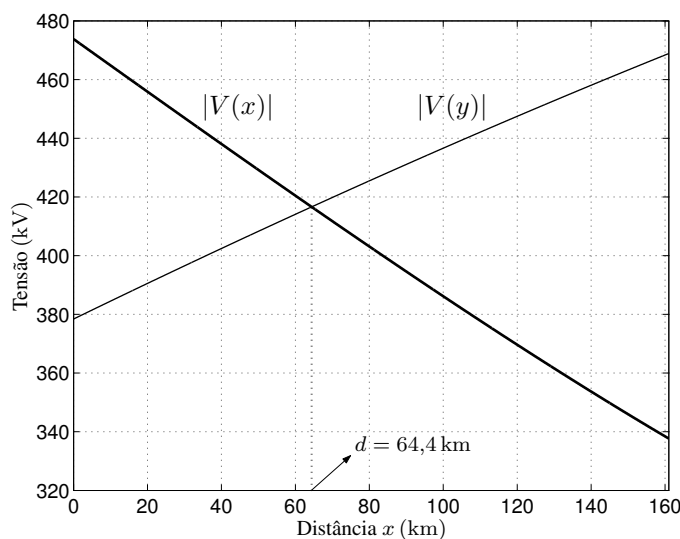


Figura 5.5: Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão sob condição de falta padrão.

Seção 5.3, cuja localização exata é $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$). A idéia é descrever o algoritmo iterativo desenvolvido passo a passo até que se obtenha uma estimativa da localização desse exemplo de falta. Vale lembrar que um ângulo $\delta = 45^\circ$ é adicionado às fases dos fasores do terminal remoto da LT a fim de simular medidas não-sincronizadas. Como informação adicional, o algoritmo desenvolvido é implementado através da linguagem de programação do *software* Matlab [103].

O objetivo de um algoritmo de localização de faltas é determinar uma estimativa \hat{d} da distância d da falta que apresente um erro de localização de falta ϵ com a menor magnitude possível. Para atingir tal objetivo, o método de localização iterativo desenvolvido neste trabalho estima que a cada iteração k a falta está localizada em um ponto hipotético F' , localizado a uma distância $d'(k)$ do terminal local da linha, como mostra a Figura 5.6. Esse procedimento é equivalente a dividir a LT original SR, mostrada na Figura 5.2, em duas LTs hipotéticas:

- linha de transmissão SF' , de comprimento $d'(k)$;
- linha de transmissão RF' , de comprimento $\ell - d'(k)$.

O procedimento adotado pelo algoritmo em questão é alterar o valor da variável $d'(k)$ até o momento em que as linhas hipotéticas SF' e RF' apresentem, respectivamente, comprimentos praticamente idênticos aos das linhas verdadeiras SF e RF , mostradas na Figura 5.2, o que pode ser visto como um processo de aproximações sucessivas. O instante em que esse método numérico deve ser interrompido é determinado através de um critério de parada, definido no final desta seção.

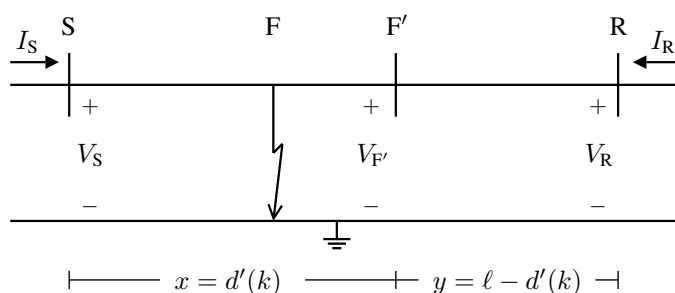


Figura 5.6: Linha de transmissão SR juntamente com as linhas de transmissão hipotéticas SF' e RF' em uma iteração k .

Desacoplamento dos Fasores

O primeiro passo do método de localização de faltas proposto consiste em aplicar uma transformação modal ou a decomposição em componentes simétricos nos fasores medidos nos terminais S e R da linha e utilizar um conjunto de componentes modais ou de seqüência em (5.11). Como descrito anteriormente, este trabalho considera o uso da decomposição em componentes simétricos, adotando os componentes de seqüência positiva no processo iterativo desenvolvido ($m = 1$). Como a linha em questão é transposta, tal transformação gera componentes de seqüência perfeitamente desacoplados.

Valor Inicial $d'(0)$

Para definir a posição inicial do ponto hipotético F', seria razoável assumir que ele estivesse localizado no meio da LT, o que implicaria adotar $d'(0) = \ell/2$. Entretanto, como mostra a Figura 5.5, as funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ podem ser aproximadas por retas com uma razoável precisão, o que torna possível arbitrar uma estimativa inicial $d'(0)$ cujo valor já é bem mais próximo do valor verdadeiro da distância d em relação a uma possível estimativa $d'(0) = \ell/2$. Para tal, a função $|V(x)|$ é aproximada neste trabalho por uma equação de primeiro grau definida por

$$V_1 = a_1x + b_1. \quad (5.13)$$

De maneira análoga, a função $|V(y)|$ é representada por

$$V_2 = a_2x + b_2. \quad (5.14)$$

Note que apesar de $|V(y)|$ ser função da distância y , a reta V_2 é expressa em termos da variável x , uma vez que pode-se considerar $y = \ell - x$. Tal fato é necessário para que se possa igualar V_1 e V_2 e assim definir um ponto de interseção entre essas retas em termos de uma única variável, no caso x , conforme mostrado adiante. Para completar essa representação de $|V(x)|$ e $|V(y)|$ através de equações de primeiro grau é necessário apenas definir os valores

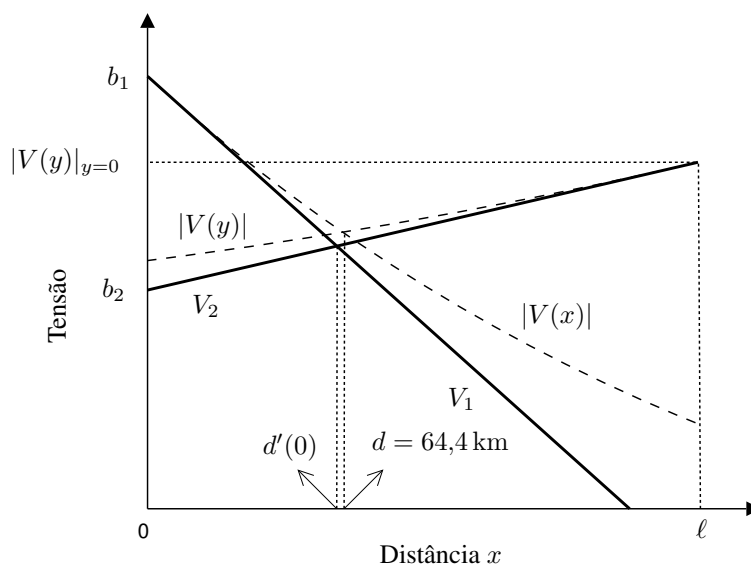


Figura 5.7: Retas V_1 e V_2 que definem a estimativa inicial $d'(0)$.

dos coeficientes angulares e lineares que caracterizam V_1 e V_2 , cujos valores devem ser definidos com base nas características de $|V(x)|$ e $|V(y)|$. A Figura 5.7 facilita o entendimento de como tal tarefa é realizada. Os coeficientes angulares a_1 e a_2 estão associados às inclinações das curvas $|V(x)|$ em $x = 0$ e $|V(y)|$ em $x = \ell$ (ou $y = 0$), respectivamente. Em outras palavras, eles representam as derivadas de $|V(x)|$ e $|V(y)|$ em $x = 0$ e $x = \ell$, respectivamente. A fim de evitar a necessidade de se realizar uma operação matemática de derivação e levando-se em conta que o conhecimento dos valores numéricos exatos desses dois coeficientes não é relevante para o bom desempenho do algoritmo em questão, os valores de a_1 e a_2 podem ser aproximados através do cálculo de (5.1) e (5.3) para dois valores subsequentes de x bastante próximos um do outro (diferenças finitas). Neste trabalho, os coeficientes lineares das retas V_1 e V_2 são calculados através de

$$a_1 = \frac{\Delta|V(x)|}{\Delta x} = \frac{|V(x)|_{x=0,001\ell} - |V(x)|_{x=0}}{0,001\ell} \quad (5.15)$$

e

$$a_2 = \frac{\Delta|V(y)|}{\Delta x} = \frac{|V(y)|_{y=0} - |V(y)|_{y=0,001\ell}}{0,001\ell}. \quad (5.16)$$

Os coeficientes lineares b_1 e b_2 definem, respectivamente, os valores da reta V_1 para $x = 0$ e da reta V_2 para $y = \ell$ (que corresponde a $x = 0$). Observando a Figura 5.7, pode-se deduzir que esses coeficientes são dados por

$$b_1 = |V(x)|_{x=0} = |V_S| \quad (5.17)$$

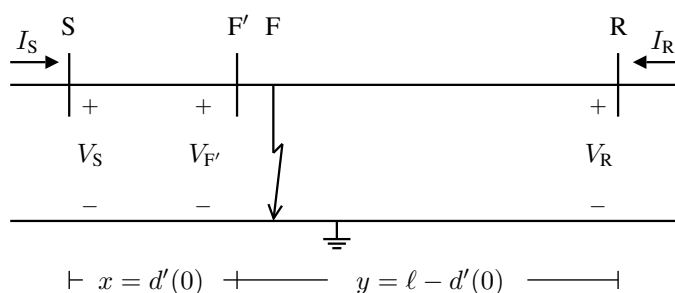


Figura 5.8: Linha de transmissão SR juntamente com as linhas de transmissão hipotéticas SF' e RF' para $k = 0$.

e

$$b_2 = |V(y)|_{y=0} - a_2\ell = |V_R| - a_2\ell. \quad (5.18)$$

Como pode-se notar na Figura 5.7, a localização do ponto de falta F é determinada pela interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ (neste exemplo, $x = d = 64,4$ km). Já a interseção entre as retas V_1 e V_2 , em cada iteração k , define a localização $d'(k)$ do ponto de falta hipotético F' (ver Figura 5.6). Assim, igualando (5.13) e (5.14) e considerando $x = d'(0)$, conclui-se que a estimativa inicial do algoritmo é dada por

$$d'(0) = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}. \quad (5.19)$$

Utilizando (5.15) a (5.19), o algoritmo proposto fornece a estimativa inicial de localização da falta padrão. Assim,

$$d'(0) = 61,5353 \text{ km}. \quad (5.20)$$

A Figura 5.8 apresenta as LTs hipotéticas SF' e RF' (que, por simplicidade, são representadas através de circuitos monofásicos) nesse passo inicial do método proposto para a localização da falta padrão. Pode-se verificar que a linha SF' é arbitrada curta demais, pois o ponto de falta F localiza-se além do ponto hipotético F'. Tal fato também pode ser observado através da Figura 5.9, que mostra as curvas $|V(x)|$ [calculada através de (5.1)] e $|V(y)|$ [calculada através de (5.3)] para $x \leq d'(0)$ e $y \leq \ell - d'(0)$, respectivamente. Pode-se notar que para $x = d'(0)$, $|V(x)| > |V(y)|$. Logo, a função $|V(x)|$ no ponto F' deve diminuir de valor, o que comprova a necessidade de aumentar a linha SF'. Já a função $|V(y)|$ no ponto F' deve aumentar de valor, o que demonstra a necessidade de diminuir o comprimento da linha RF'.

Iteração k

O processo de obtenção de cada estimativa $d'(k)$ também se baseia na aproximação das curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ por duas retas. Entretanto, o procedimento de determinação das

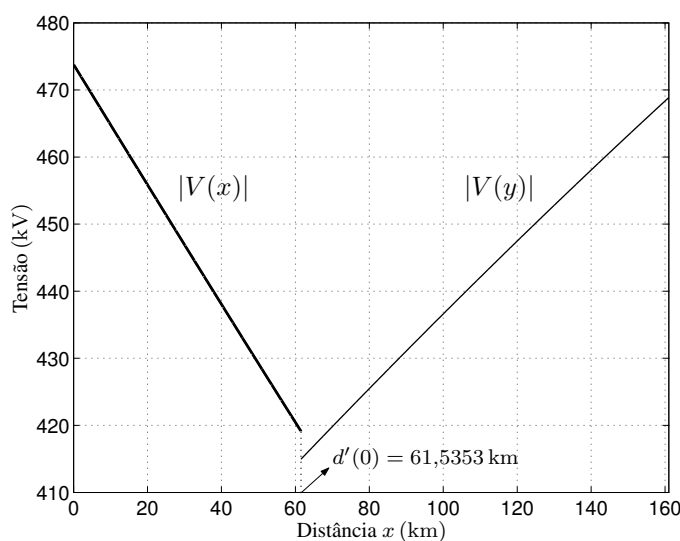


Figura 5.9: Magnitudes das funções $V(x)$ para $0 \leq x \leq d'(0)$ e $V(y)$ para $0 \leq y \leq \ell - d'(0)$.

equações de primeiro grau V_1 e V_2 em cada iteração k é ligeiramente diferente em relação ao empregado na etapa de definição da estimativa de localização de falta inicial $d'(0)$. De modo a agilizar a convergência do processo de aproximações sucessivas desenvolvido, as informações necessárias para a definição dos coeficientes angulares e lineares de V_1 e V_2 são extraídas do ponto $x = d'(k - 1)$ em vez de se utilizar informações provenientes dos pontos $x = 0$ e $x = \ell$, uma vez que $x = d'(k - 1)$ já é mais próximo da posição verdadeira da falta $x = d$. Para ilustrar tal idéia, considere a Figura 5.10, que apresenta as retas V_1 e V_2 na primeira iteração do processo de localização da falta padrão. Note nessa figura a necessidade de alterar a origem do eixo x para o ponto $x = d'(k - 1)$, o que implica na adoção de uma transformação da variável independente. Para tal, a variável x em (5.13) e (5.14) deve ser substituída por $x - d'(k - 1)$, o que significa que em cada iteração k as equações que aproximam as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são definidas por

$$V_1 = a_1[x - d'(k - 1)] + b_1 \quad (5.21)$$

e

$$V_2 = a_2[x - d'(k - 1)] + b_2 \quad (5.22)$$

respectivamente. Os coeficientes angulares a_1 e a_2 de V_1 e V_2 representam, respectivamente, as inclinações das curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ no ponto $x = d'(k - 1)$. De maneira similar à etapa de obtenção da estimativa inicial $d'(0)$, esses coeficientes são aproximados através do cálculo das funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para dois valores subsequentes de x próximos um do

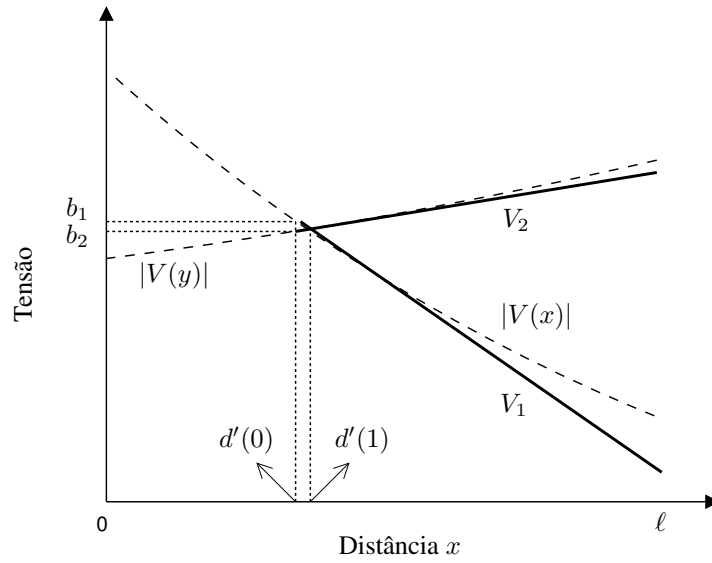


Figura 5.10: Retas V_1 e V_2 na iteração $k = 1$.

outro [$x = d'(k - 1)$ e $x = 1,001d'(k - 1)$]. Para tal, utiliza-se

$$a_1 = \frac{\Delta|V(x)|}{\Delta x} = \frac{|V(x)|_{x=1,001d'(k-1)} - |V(x)|_{x=d'(k-1)}}{0,001d'(k-1)} \quad (5.23)$$

e

$$a_2 = \frac{\Delta|V(y)|}{\Delta x} = \frac{|V(y)|_{y=[\ell-1,001d'(k-1)]} - |V(y)|_{y=[\ell-d'(k-1)]}}{0,001d'(k-1)}. \quad (5.24)$$

Já os coeficientes lineares b_1 e b_2 devem representar os próprios valores das curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ no ponto $x = d'(k - 1)$, respectivamente. Sendo assim, eles são calculados através de

$$b_1 = |V(x)|_{x=d'(k-1)} \quad (5.25)$$

e

$$b_2 = |V(y)|_{y=\ell-d'(k-1)}. \quad (5.26)$$

Igualando (5.21) e (5.22), considerando $x = d'(k)$ e fazendo as devidas manipulações matemáticas, define-se que a estimativa de localização de falta em cada iteração k do método proposto é dada por

$$d'(k) = \frac{(a_1 - a_2)d'(k - 1) + b_2 - b_1}{a_1 - a_2}. \quad (5.27)$$

Utilizando (5.23) a (5.27), o algoritmo determina que a estimativa de localização da falta padrão na primeira iteração é

$$d'(1) = 64,3953 \text{ km}. \quad (5.28)$$

É interessante notar que em apenas uma iteração o algoritmo em questão já fornece uma estimativa de localização da falta padrão cujo valor numérico é praticamente igual ao verdadeiro ($d = 64,4$ km).

Iteração n

Devido à natureza iterativa do processo de aproximações sucessivas desenvolvido, é necessário adotar um critério de parada para o método de localização de faltas proposto. Para tal, considera-se atingida a convergência do processo na iteração $k = n$, na qual

$$|d'(n) - d'(n - 1)| \leq q\ell \quad (5.29)$$

onde

$$0 < q \ll 1. \quad (5.30)$$

Como a convergência do processo é atingida na iteração n , a estimativa de localização de falta fornecida pelo método proposto é dada por

$$\hat{d} = d'(n). \quad (5.31)$$

É natural que o critério de parada definido por (5.29) influencie no erro de localização de falta dado por (2.7). Entretanto, se o valor de q for escolhido suficientemente pequeno, a parcela do erro de localização de falta ϵ oriunda do critério de parada do algoritmo torna-se desprezável. Os testes realizados nesta pesquisa nos permitem afirmar que um valor $q = 0,001$ é adequado para o bom desempenho do método proposto, o que significa interromper o processo de aproximações sucessivas no instante em que a diferença entre duas estimativas de localização de falta subsequentes for menor do que 0,1 % do comprimento ℓ da linha. Neste exemplo de localização da falta padrão, o algoritmo proposto encerra o processo de busca quando

$$d'(n) - d'(n - 1) \leq 0,161 \text{ km}. \quad (5.32)$$

O número de iterações necessárias para obter a convergência é $n = 2$ e a estimativa de localização da falta padrão é

$$\hat{d} = d'(2) = 64,3990 \text{ km}. \quad (5.33)$$

Através de (2.7), define-se que o erro de localização de falta dessa estimativa é

$$\epsilon = -6,1633 \times 10^{-4} \%. \quad (5.34)$$

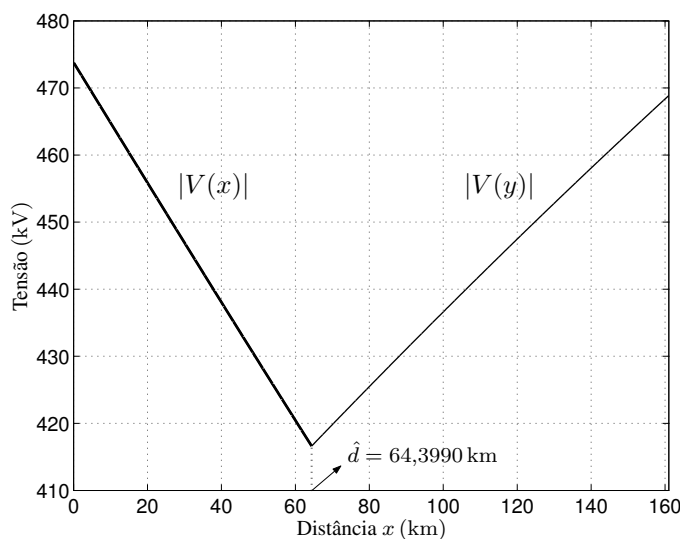


Figura 5.11: Magnitudes das funções $V(x)$ para $0 \leq x \leq \hat{d}$ e $V(y)$ para $0 \leq y \leq \ell - \hat{d}$ (última iteração).

Note que a magnitude do erro ϵ é bastante baixa, desprezável na prática. Esse pequeno erro de localização de falta pode ser atribuído aos seguintes fatores:

- i) precisão finita na representação numérica das variáveis e das operações aritméticas consideradas no processo de aproximação sucessiva;
- ii) pequenos erros de determinação dos fasores;
- iii) necessidade de adoção de um critério de parada para o algoritmo proposto.

Como ilustração, a Figura 5.11 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ calculadas para $0 \leq x \leq \hat{d}$ e $0 \leq y \leq \ell - \hat{d}$. Pode-se notar que os valores dessas funções no ponto $x = \hat{d}$ são praticamente iguais, não podendo ser distinguidos visualmente. Como curiosidade, as formas de onda apresentadas anteriormente na Figura 5.3 correspondem às tensões temporais no ponto F obtidas neste exemplo de aplicação do método proposto na localização da falta padrão.

5.6 Caso de Risco: Dois Pontos de Interseção Entre as Curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$

Na Seção 5.4 foi mostrado que a idéia central do método de localização de faltas desenvolvido baseia-se no fato de que as magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ calculadas a partir de (5.1) e (5.3), respectivamente, decaem de forma quase linear com o aumento das distâncias x e y . Tal fato é bem evidente no gráfico da Figura 5.5, que apresenta as curvas

$|V(x)|$ e $|V(y)|$ ao longo da LT sob a condição de falta padrão. Utilizando essa característica, apresentamos na seção anterior o funcionamento do método numérico desenvolvido passo a passo, através da localização da falta padrão definida na Seção 5.3. Tal procedimento é adotado por fins didáticos, com o objetivo de facilitar o entendimento da técnica em questão. Entretanto, apesar de as diversas simulações realizadas mostrarem que essa característica de variação quase linear de $|V(x)|$ e $|V(y)|$ ao longo de toda a LT ser verificada na maioria dos casos estudados, ela nem sempre é verdadeira. Em geral, condições de falta que resultem em uma variação de $|V(x)|$ ou $|V(y)|$ não tão linear quanto a verificada na Figura 5.5 não afetam o desempenho do algoritmo de localização de faltas apresentado. Algumas situações desse tipo (variação de $|V(x)|$ ou $|V(y)|$ não tão linear) são apresentadas ao longo do Capítulo 6, no qual o método proposto é testado na localização das mais variadas condições de falta.

Entretanto, quando a característica de variação quase linear das funções $|V(x)|$ e/ou $|V(y)|$ não é verificada, existe a possibilidade de ocorrer uma situação de risco para um método de localização de faltas baseado apenas nas magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$: as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ calculadas para $0 \leq x \leq \ell$ podem apresentar dois pontos de interseção, o que significa que (5.10) apresenta duas possíveis soluções x_1 e x_2 localizadas dentro do comprimento da LT. Devido a sua importância, (5.10) é aqui repetida:

$$|V_S \cosh(\gamma d) - I_S Z_c \sinh(\gamma d)| = |V_R \cosh[\gamma(\ell - d)] - I_R Z_c \sinh[\gamma(\ell - d)]|. \quad (5.35)$$

É natural que tal expressão possua mais de uma solução, pois ela representa uma igualdade entre as magnitudes (funções quadráticas) de duas funções complexas compostas por termos hiperbólicos. Logo, é preciso estudar se o método de localização de faltas proposto converge para a solução correta em situações desse tipo. Os diversos testes realizados com o algoritmo em questão, alguns deles apresentados no Capítulo 6 deste trabalho, nos permitem afirmar que as condições de falta que resultam em duas soluções x_1 e x_2 para (5.35) pertencentes à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$ podem ser classificadas em um dos seguintes casos:

- a) apenas uma das curvas de magnitude ($|V(x)|$ ou $|V(y)|$) não apresenta um decaimento quase linear ao longo de toda a LT, o que resulta em soluções x_1 e x_2 distantes uma da outra. Como a parte não-linear da curva problemática não chega a ser considerada pelo algoritmo, esse tipo de situação não resulta em erros de convergência. Situações do caso (a) podem ocorrer para faltas fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra;
- b) ambas as curvas de magnitude ($|V(x)|$ e $|V(y)|$) não apresentam um decaimento quase linear ao longo de toda a LT, o que geralmente resulta em soluções x_1 e x_2 próximas uma da outra. Esse tipo de situação ocorre para faltas trifásicas não-sólidas e resulta em erros de convergência em aproximadamente 50 % dos casos estudados. Apesar disso, não é razoável afirmar que o caso (b) é mais importante do que o caso (a), uma vez que a ocorrência de faltas trifásicas em um sistema de potência é bastante rara (ver Tabela 1.2).

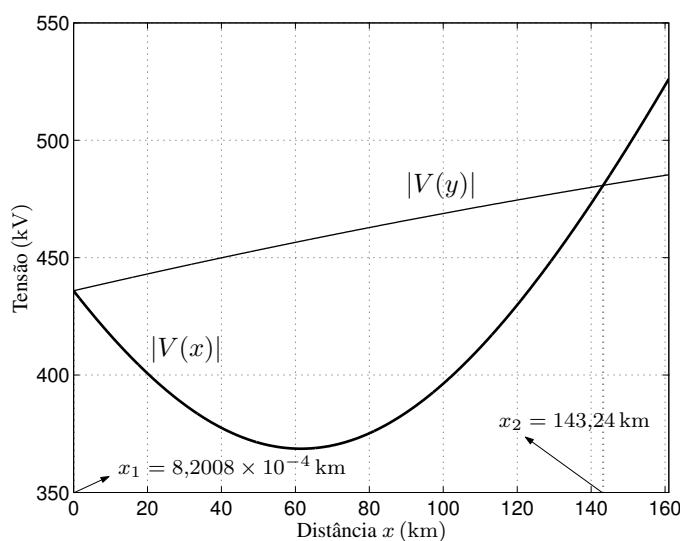


Figura 5.12: Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 0$ ($\bar{d} = 0$).

Portanto, o estudo relativo à convergência do método de localização de faltas desenvolvido quando da existência de duas soluções para (5.10) [repetida em (5.35)] pertencentes à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$ deve considerar os casos (a) e (b) separadamente. Note que estamos excluindo desta análise o caso de faltas trifásicas sólidas, uma vez que esse tipo de falta nunca resulta em duas soluções para (5.10) localizadas dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$, como esclarece a Seção 5.6.2.

5.6.1 Caso (a): Faltas Fase-Terra, Fase-Fase e Fase-Fase-Terra

Um exemplo de situação pertencente ao caso (a) ocorre quando a LT apresentada na Seção 5.3 é submetida a uma condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizada exatamente no seu terminal local ($d = \bar{d} = 0$). A Figura 5.12 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ calculadas ao longo da LT a partir dos fasores dos seus dois terminais, de onde pode-se verificar que os dois pontos de interseção são

$$x_1 = 8,2007 \times 10^{-4} \text{ km} \quad \text{e} \quad x_2 = 143,24 \text{ km}.$$

Note que x_1 é a solução correta, apesar de o seu valor ser ligeiramente maior do que zero, que foi o valor da distância d utilizado na simulação dessa condição de falta no *software* ATP. Essa pequena diferença numérica se deve aos fatores (i) e (ii) apresentados no final da seção anterior. Como apenas a curva $|V(x)|$ não apresenta um decaimento linear ao longo de toda a LT, essa situação realmente pertence ao caso (a). Note também a grande diferença entre os valores de x_1 (solução correta) e x_2 (solução incorreta).

Tabela 5.2: Estimativas de localização de falta para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 0$ ($\bar{d} = 0$)

Iteração k	Estimativa $d'(k)$
0	-4,2358 km
1	$-8,2408 \times 10^{-2}$ km
2	$7,8466 \times 10^{-4}$ km

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos após a aplicação do algoritmo proposto para a localização dessa falta, de onde se conclui que ele converge para a solução correta x_1 , fornecendo uma estimativa de localização de falta

$$\hat{d} = 7,8466 \times 10^{-4} \text{ km}$$

que apresenta um erro de localização de falta

$$\epsilon = 4,2525 \times 10^{-4} \%$$

cuja magnitude é insignificante. Em todas as situações pertencentes ao caso (a) estudadas neste trabalho, o método proposto converge para a solução correta. Vale destacar que situações do caso (a) são raras. Por exemplo, uma delas é verificada nesse caso de falta localizada no terminal local. Considerando essa mesma condição de falta mas com $d = 1,61$ km ($\bar{d} = 0,01$), a existência de duas soluções para (5.35) dentro da faixa $0 \leq x \leq \ell$ não é mais verificada.

O estudo mais detalhado de cada iteração do método proposto aplicado na localização dessa falta (fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 0$) permite explicar por que o algoritmo converge para a solução correta em situações que se enquadram no caso (a). Considere a Figura 5.13(a), que apresenta as retas V_1 e V_2 para $k = 0$, cujo ponto de interseção define uma estimativa de localização de falta inicial

$$d'(0) = -4,2358 \text{ km.} \quad (5.36)$$

Essa estimativa $d'(0)$ não possui significado físico, uma vez que o ponto $x = -4,2358$ km não pertence à LT simulada. Apesar disso, a estimativa inicial (5.36) é muito mais próxima de $x_1 = 8,2007 \times 10^{-4}$ km (solução correta) do que de $x_2 = 143,24$ km (solução incorreta). Como na primeira iteração do processo de aproximações sucessivas os coeficientes de V_1 e V_2 são calculados com base em informações extraídas do ponto $x = d'(0)$, a interseção entre as retas V_1 e V_2 na primeira iteração tende a se aproximar do ponto x_1 . Como mostra a

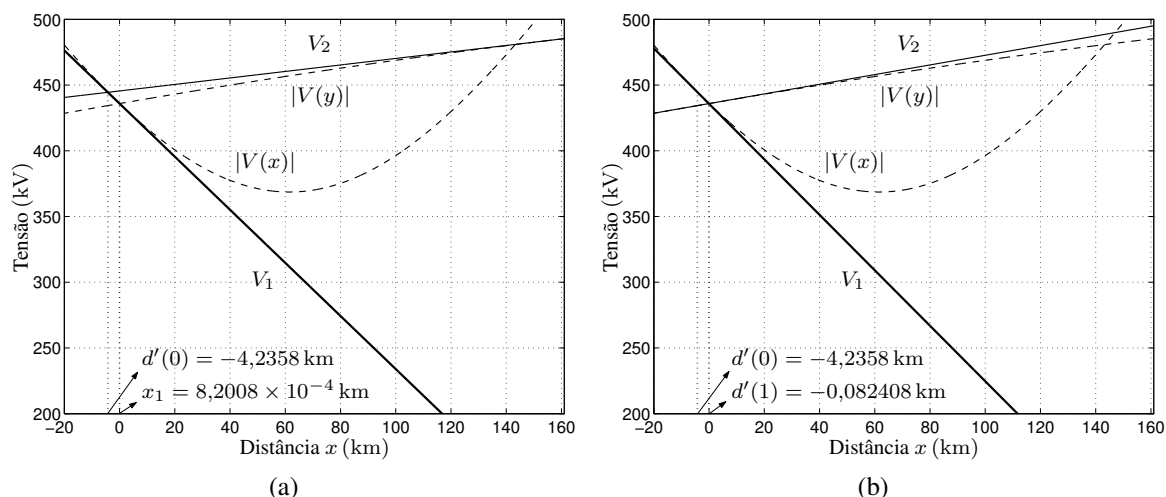


Figura 5.13: Retas V_1 e V_2 para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (a) Valor inicial. (b) Primeira iteração.

Figura 5.13(b), a estimativa de localização de falta na primeira iteração é

$$d'(1) = -8,2408 \times 10^{-2} \text{ km.} \quad (5.37)$$

Pode-se perceber que o algoritmo está realmente convergindo para a solução correta x_1 . Na segunda iteração do processo, o método proposto atinge a convergência, fornecendo uma estimativa de localização de falta

$$\hat{d} = d'(2) = 7,8466 \times 10^{-4} \text{ km.}$$

Uma outra maneira de compreender por que o algoritmo desenvolvido converge para a solução correta em situações pertencentes ao caso (a) é verificar que a estimativa inicial $d'(0)$ do exemplo anterior, dada por (5.36), localiza-se em uma região na qual tanto $|V(x)|$ quanto $|V(y)|$ apresentam características muito semelhantes a retas, como mostra a Figura 5.13(a). Tal fato só deixa de ser verdadeiro a partir de $x \cong 50$ km, quando a curva $|V(x)|$ apresenta um ponto de mínimo. Em outras palavras, somente a parcela da curva $|V(x)|$ que apresenta uma característica praticamente linear é utilizada pelo algoritmo. Caso a estimativa inicial do algoritmo fosse maior do que 50 km, o processo numérico poderia convergir para a solução incorreta $x_2 = 143,24$ km. Esse tipo situação nunca é verificada para as condições de falta fase-terra, fase-fase ou fase-fase-terra consideradas neste trabalho. Em todas as situações estudadas, as retas V_1 e V_2 para $k = 0$ representam de forma confiável as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ no início e no final da linha, respectivamente, o que sempre resulta em uma estimativa de localização de falta inicial próxima do valor verdadeiro da distância d .

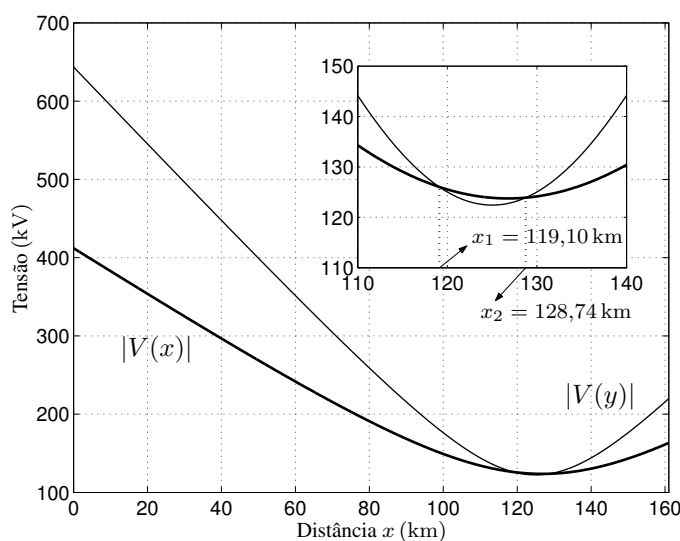


Figura 5.14: Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$).

5.6.2 Caso (b): Falta Trifásicas Não-Sólidas

Um exemplo de situação pertencente ao caso (b) ocorre quando a LT apresentada na Seção 5.3 é submetida a uma condição de falta trifásica ocorrida a uma distância $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$) do terminal local da LT e com resistência de falta $R_F = 10 \Omega$. A Figura 5.14 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ calculadas ao longo da LT, cujas interseções definem dois possíveis valores para a estimativa de localização de falta. Assim,

$$x_1 = 119,10 \text{ km} \quad \text{e} \quad x_2 = 128,74 \text{ km}.$$

Note que nesse caso x_2 é a solução correta, apesar de o seu valor ser $128,74 \text{ km}$ em vez de $128,8 \text{ km}$, que é o valor da distância d adotado no ATP. Assim como na condição de falta utilizada como exemplo na Seção 5.6.1, essa pequena diferença numérica pode ser atribuída aos fatores (i) e (ii) apresentados no final da Seção 5.5. Note que o fato de as soluções x_1 e x_2 serem próximas ocorre porque, diferentemente do caso (a), ambas as curvas não apresentam a característica de variação quase linear ao longo de toda a LT.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos em cada iteração k do método proposto aplicado na localização deste exemplo de falta trifásica não-sólida, que fornece uma estimativa de localização de falta

$$\hat{d} = d'(4) = 119,108 \text{ km}. \quad (5.38)$$

Dois pontos a respeito dessa estimativa de localização de falta devem ser observados. O primeiro, e mais importante, é que nesse caso o algoritmo converge para a solução incorreta

Tabela 5.3: Estimativas de localização de falta para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$)

Iteração k	Estimativa $d'(k)$
0	121,782 km
1	117,400 km
2	118,917 km
3	119,107 km
4	119,108 km

x_1 . Isso ocorre porque, diferentemente das situações do caso (a), as parcelas das curvas $|V(x)|$ e/ou $|V(y)|$ que apresentam um comportamento bastante não-linear podem vir a ser utilizadas pelo algoritmo proposto em cada iteração k . Como essas partes das curvas não apresentam significado físico, a convergência para uma solução incorreta torna-se possível. O outro ponto a ser observado é que na imensa maioria das condições de falta estudadas neste trabalho que não resultam em um erro de convergência, o método desenvolvido requer no máximo três iterações para atingir a convergência. Já em casos em que se verifica um erro de convergência, o algoritmo geralmente utiliza um número maior de iterações, como neste exemplo, em que $n = 4$. Apesar de esse tipo de situação (falta trifásica com resistência de falta relativamente elevada) não ser comum na prática, a sua consequência é grave e deve ser solucionada. Para tal, a Seção 5.6.3 apresenta uma técnica que reduz substancialmente a probabilidade de um erro de convergência como o ocorrido neste exemplo.

Uma situação particular é verificada quando da ocorrência de faltas trifásicas sólidas na LT. A Figura 5.15 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para as mesmas condições da falta padrão, exceto que nesse caso a falta ocorrida na LT é trifásica e sólida ($d = 64,4 \text{ km}$). Pode-se verificar que para uma falta dessa natureza as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ apresentam o mesmo ponto de mínimo, o que resulta em pontos de interseção

$$x_1 = x_2.$$

Tal fato ocorre porque a tensão no ponto de falta F ($x = d$) no caso de uma falta trifásica sólida deve ser obrigatoriamente nula, independentemente se ela for calculada através dos fasores do terminal local ou dos fasores do terminal remoto da linha. Sendo assim, faltas trifásicas sólidas não apresentam riscos à convergência correta do método de localização de faltas proposto. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos após a aplicação do algoritmo desenvolvido na localização desta falta trifásica sólida, de onde se verifica que o método converge em apenas uma iteração, fornecendo uma estimativa

$$\hat{d} = 64,3998 \text{ km}$$

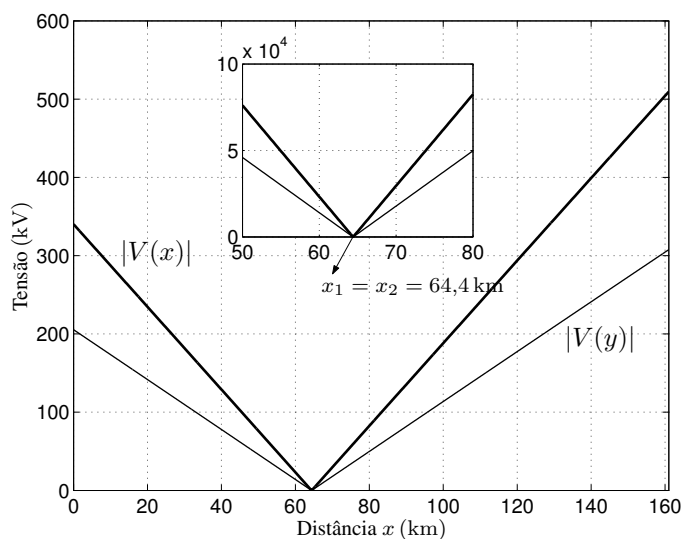


Figura 5.15: Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta trifásica sólida com $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$).

Tabela 5.4: Estimativas de localização de falta para a condição de falta trifásica sólida com $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$)

Iteração k	Estimativa $d'(k)$
0	64,5050 km
1	64,3998 km

que apresenta um erro de localização de falta

$$\epsilon = -1,2392 \times 10^{-4} \%$$

cuja magnitude é desprezável. Note que nesse tipo de situação as características das curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são bem diferentes das mostradas na Figura 5.5 (falta padrão). Nesse caso, as duas funções apresentam variações quase lineares ao longo de toda a LT; entretanto, as suas derivadas mudam de sinal após o ponto $x = d$. Apesar disso, o método iterativo desenvolvido funciona de forma adequada também na localização de faltas trifásicas sólidas, que sempre apresentam esse tipo de característica.

5.6.3 Técnica Desenvolvida Para a Redução da Possibilidade de Um Erro de Convergência

Detectar a ocorrência de uma condição de falta pertencente ao caso (b), como a mostrada na Figura 5.14, é relativamente fácil. Pode-se verificar nessa figura que no ponto $x = 0$, as derivadas das funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ em relação a x são negativas; em $x = \ell$,

as derivadas dessas funções em relação a x são positivas. Tal característica só é verificada quando da ocorrência de faltas trifásicas, o que permite identificar a existência de um possível caso problemático. Assim como na etapa de definição dos coeficientes angulares a_1 e a_2 das retas V_1 e V_2 , o conhecimento dos valores exatos dessas derivadas não é importante. Mais do que isso, apenas os sinais de tais derivadas são necessários para identificar a ocorrência de uma falta trifásica. Tais sinais podem ser facilmente determinados através do cálculo das funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para dois valores subseqüentes de x próximos um do outro, tanto no final quanto no início da linha. Assim, pode-se utilizar as seguintes expressões para verificar se um caso como o mostrado na Figura 5.14 está ocorrendo:

$$\frac{|V(x)|_{x=0,001\ell} - |V(x)|_{x=0}}{0,001\ell} < 0 \quad (5.39)$$

e

$$\frac{|V(x)|_{x=\ell} - |V(x)|_{x=0,999\ell}}{0,001\ell} > 0. \quad (5.40)$$

Essas mesmas expressões devem ser verdadeiras para a curva $|V(y)|$, apenas substituindo a função $|V(x)|$ pela função $|V(y)|$.

Diversas alternativas foram testadas a fim de reduzir a chance de o método de localização de faltas proposto convergir para uma solução incorreta em situações pertencentes ao caso (b). A única técnica que se mostrou eficaz consiste em determinar uma estimativa inicial $d'(0)$ para o algoritmo cujo valor seja bem próximo da distância d da falta. Para explicar o princípio de operação dessa técnica, vamos utilizar novamente como exemplo a condição de falta trifásica com $\bar{d} = 0,8$ e $R_F = 10\Omega$, cujas curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ mostradas na Figura 5.14 definem as soluções

$$x_1 = 119,10 \text{ km} \quad \text{e} \quad x_2 = 128,74 \text{ km}.$$

Inicialmente, o intervalo de busca do algoritmo proposto situa-se entre um limite inferior

$$x_i = 0$$

e um limite superior

$$x_s = \ell.$$

Em outras palavras, o intervalo de busca inicial é toda a LT. Utilizando (5.15) a (5.19), define-se uma estimativa de localização de falta inicial

$$d'(0) = 121,782 \text{ km}. \quad (5.41)$$

Note que essa estimativa inicial é mais próxima de x_1 (solução incorreta) do que de x_2

(solução correta). Como mostrado na seção anterior (ver Tabela 5.3), adotando esse valor inicial para o método de localização de faltas desenvolvido, obtém-se uma estimativa de localização de falta incorreta

$$\hat{d} = d'(4) = 119,108 \text{ km.} \quad (5.42)$$

Como mencionado anteriormente, a técnica desenvolvida para solucionar tal problema de convergência, ou pelo menos reduzir significativamente a probabilidade de ocorrência de um erro dessa natureza, consiste em melhorar a qualidade dessa estimativa inicial $d'(0)$, o que significa definir uma estimativa cujo valor seja o mais próximo possível da distância d . Para isso, verifica-se se a estimativa inicial, que neste exemplo é dada por (5.41), está mais próxima do limite inferior de busca $x_i = 0$ ou do limite superior de busca $x_s = \ell$. Caso esteja mais próxima de x_i , é provável que a falta localize-se antes da metade da linha. Nesse caso, faz-se $x_s = d'(0)$. Caso contrário, é mais provável que a falta esteja localizada além da metade da linha, o que torna interessante considerar $x_i = d'(0)$. Feito isso, uma nova estimativa inicial é definida normalmente, através de (5.19). Esse processo deve ser repetido até o momento em que se obtém uma estimativa inicial de melhor qualidade. Matematicamente, essas decisões são expressas através das seguintes relações:

$$\begin{cases} x_i = d'(0) & \text{e} & x_s = x_s & \text{se} & d'(0) > (x_i + x_s)/2 \\ x_i = x_i & \text{e} & x_s = d'(0) & \text{se} & d'(0) < (x_i + x_s)/2 \end{cases} \quad (5.43)$$

Assim, o processo de aproximações sucessivas apresentado na seção anterior é iniciado após a definição de i valores iniciais. Através dos testes realizados, concluímos que é necessária a definição de $i = 3$ estimativas iniciais $d'(0)$. Para esta condição de falta trifásica com $\bar{d} = 0,8$, as estimativas iniciais obtidas através de (5.43) são mostradas na Tabela 5.5. Neste exemplo, o valor inicial do algoritmo passa a ser

$$d'(0) = 130,219 \text{ km.} \quad (5.44)$$

Note que agora a estimativa $d'(0)$ é mais próxima da solução correta x_2 do que da incorreta x_1 . Os resultados obtidos em cada iteração do método de localização de faltas considerando a estimativa inicial dada por (5.44) são mostrados na Tabela 5.6. Após três iterações, obtém-se uma estimativa de localização de falta

$$\hat{d} = 128,747 \text{ km} \quad (5.45)$$

cujo erro de localização de falta é

$$\epsilon = -3,2317 \times 10^{-2} \%$$

Tabela 5.5: Valores iniciais para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$), considerando $i = 3$

Passo	Limite x_i	Limite x_s	Estimativa $d'(0)$
1	0 km	161 km	121,782 km
2	121,782 km	161 km	137,000 km
3	121,782 km	137,000 km	130,219 km

Tabela 5.6: Estimativas de localização para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 128,8 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,8$), considerando como valor inicial $d'(0) = 130,219 \text{ km}$

Iteração k	Estimativa $d'(k)$
1	128,923 km
2	128,752 km
3	128,747 km

Note que na realidade esse pequeno erro se deve aos fatores (i) e (ii) citados na Seção 5.5, uma vez que o processo de aproximações sucessivas utilizado pelo algoritmo converge corretamente para o valor de x_2 (ver Figura 5.14), a menos de uma pequena diferença numérica ocasionada pelo critério de parada.

Uma outra maneira de interpretar por que esse processo de melhora da qualidade da estimativa inicial $d'(0)$ reduz a probabilidade de convergência do método de localização de faltas proposto para uma solução incorreta é comparar o tamanho do intervalo de busca final $x_2 - x_1$ com o tamanho do intervalo de busca inicial $x_s - x_i$. Para a condição de falta considerada nesta seção, a diferença entre as duas possíveis soluções é

$$x_2 - x_1 = 128,74 - 119,10 = 9,64 \text{ km.} \quad (5.46)$$

No início do processo, o intervalo de busca é toda a LT, pois

$$x_s - x_i = 161 - 0 = 161 \text{ km.} \quad (5.47)$$

Logo, a diferença entre as soluções x_1 e x_2 corresponde a apenas 5,98% do intervalo total de busca. Como consequência, o método proposto fornece uma estimativa de localização de falta incorreta, dada por (5.42). Aplicando o processo de melhora da qualidade do valor inicial definido por (5.43) considerando $i = 3$, o tamanho do intervalo final de busca passa a ser dado por

$$x_s - x_i = 137,000 - 121,782 = 15,218 \text{ km} \quad (5.48)$$

como mostra a Tabela 5.5. Logo, a diferença entre os pontos de interseção x_1 e x_2 corresponde a 63,34 % do tamanho do intervalo final de busca do algoritmo. É como se para o intervalo de busca original, a distância entre os pontos x_1 e x_2 fosse de 101,97 km em vez de apenas 9,64 km. Nesse tipo de situação em que os dois pontos de interseção entre $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são distantes um do outro, o método iterativo desenvolvido funciona muito bem, como ilustra o exemplo apresentado na Seção 5.6.2. É como se transformássemos uma situação pertencente ao caso (b) em uma do caso (a). Logo, apesar de não se ficar completamente imune a um erro de convergência, a estratégia de definição de i valores iniciais $d'(0)$ reduz substancialmente a chance de ocorrer um erro de convergência do processo iterativo. Usando essa técnica, o método proposto converge para a solução correta em todas as situações estudadas.

Uma questão que pode ser levantada é por que não utilizar apenas esse processo de definição de i valores iniciais como critério de busca para qualquer tipo de falta, deixando de lado o processo de aproximações sucessivas apresentado na Seção 5.5. Tal procedimento não deve ser adotado basicamente por dois motivos. Primeiro, como em cada iteração k o processo de aproximações sucessivas desenvolvido extrai os coeficientes angulares e lineares das retas V_1 e V_2 através de informações obtidas no ponto $x = d'(k - 1)$, ele converge mais rapidamente do que o processo de definição de i valores iniciais, que busca essas informações nos pontos x_i e x_s , que, em geral, são mais distantes da localização d da falta em relação ao ponto $x = d'(k - 1)$. O segundo, e mais importante, motivo é que em algumas condições de falta pertencentes ao caso (b), o algoritmo definido por (5.43) resulta em um erro de localização de falta maior do que aquele obtido pelo processo de aproximações sucessivas apresentado na Seção 5.5. Por exemplo, usando apenas o processo de definição de i valores iniciais dado por (5.43) e considerando o mesmo critério de parada definido por (5.29), são necessárias sete iterações, em vez de apenas três, para se obter uma estimativa de localização dessa falta trifásica

$$\hat{d} = 128,559 \text{ km} \quad (5.49)$$

cujo erro de localização de falta é

$$\epsilon = -1,4956 \times 10^{-1} \%$$

Uma estimativa com erro dessa magnitude é adequada para servir como valor inicial para o método proposto, mas pode ser considerada pobre em relação à dada por (5.45) como estimativa de localização dessa falta, levando-se em consideração que tanto os fasores de tensão e corrente dos terminais S e R quanto os parâmetros da LT apresentam erros praticamente nulos. Além disso, em outras situações estudadas verifica-se um erro de localização de falta ainda maior, que pode atingir valores próximos a 1 %.

5.6.4 Possíveis Condições de Teste da Estimativa de Localização de Falta Obtida

Como visto anteriormente, a possibilidade de existir mais de uma solução para (5.35) pertencente à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$ oferece riscos à convergência de um método de localização de faltas baseado apenas nas magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$. Sendo assim, é interessante definir requisitos que permitam verificar se determinada estimativa de localização de falta é ou não correta.

A possibilidade mais simples é verificar se a estimativa obtida pertence à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Caso não seja, o algoritmo deve ser executado novamente considerando um valor inicial diferente. Esse tipo de teste só seria necessário caso se utilizasse um método de otimização tradicional para a localização da falta, uma vez que o método proposto sempre converge para a solução pertencente à faixa $0 \leq x \leq \ell$.

Quando a estimativa obtida pertence à faixa $0 \leq x \leq \ell$, o seu teste deve ser mais elaborado. Vamos começar este estudo pelo caso (a), em que as duas soluções x_1 e x_2 são distantes uma da outra. Para isso, considere novamente a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = \bar{d} = 0$ apresentada na Seção 5.6.1, cujas curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são mostradas na Figura 5.12. Como discutido anteriormente, nesse tipo de situação apenas uma das curvas, no caso $|V(x)|$, não apresenta um decaimento praticamente linear ao longo de toda a LT. Note que essa curva apresenta um ponto de mínimo, o que significa que o sinal da sua derivada se altera ao longo da LT. Tal característica permite definir uma estratégia de verificação da solução encontrada. A solução correta nesse tipo de situação é aquela que apresenta as seguintes condições:

$$\left. \frac{d|V(x)|}{dx} \right|_{x=\hat{d}} < 0 \quad (5.50)$$

e

$$\left. \frac{d|V(y)|}{dx} \right|_{x=\hat{d}} > 0. \quad (5.51)$$

Note que nesse exemplo apenas a solução correta x_1 satisfaz essas duas condições; a solução incorreta x_2 não satisfaz a condição (5.50), cuja derivada apresenta um sinal positivo. O método proposto também não necessita dessa etapa de teste, uma vez que sempre converge para a solução correta em situações pertencentes ao caso (a). Se fosse empregado um algoritmo de otimização tradicional para a localização dessa falta, poderiam-se utilizar as relações (5.50) e (5.51) para testar a solução encontrada.

O teste das soluções que se enquadram no caso (b) é mais complexo. A Figura 5.16 apresenta uma ampliação em torno das soluções x_1 e x_2 para dois casos de faltas trifásicas com $R_F = 10 \Omega$: a primeira com $d = 128,8 \text{ km}$ (condição estudada detalhadamente na

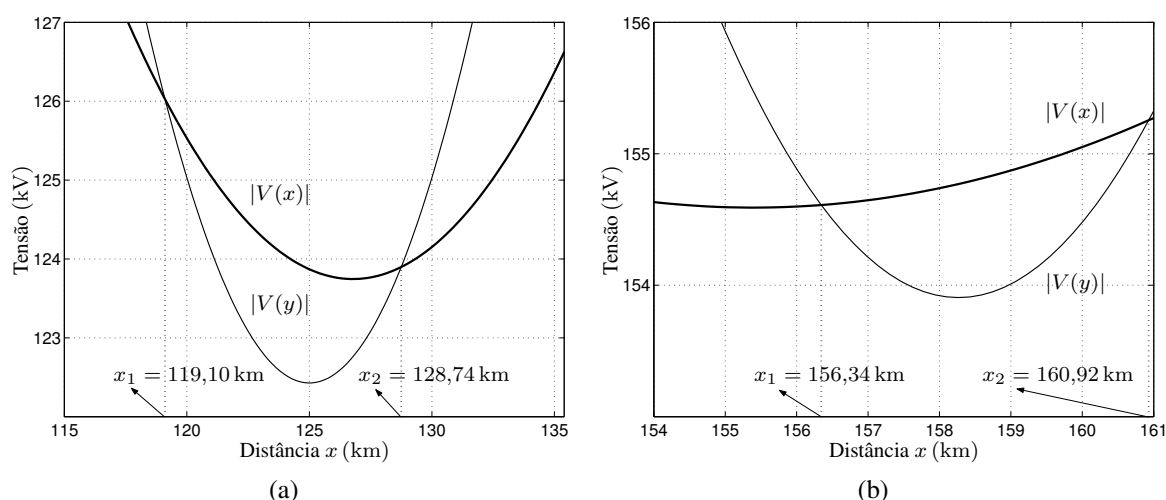


Figura 5.16: Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$. (a) Distância $d = 128,8$ km ($\bar{d} = 0,8$). (b) Distância $d = 161$ km ($\bar{d} = 1,0$).

Seção 5.6.2) e a segunda com $d = 161$ km (falta localizada no terminal remoto R). Em ambos os casos, a solução x_2 é a correta, e o método proposto converge para elas de forma correta. Entretanto uma etapa de teste igual à definida anteriormente é inadequada, pois como a solução x_2 se encontra além do ponto de mínimo da curva $|V(x)|$, a derivada dessa curva em $x = x_2$ apresenta um sinal positivo. Logo, as condições (5.50) e (5.51) nem sempre são verificadas para os casos de faltas trifásicas não-sólidas. Talvez seja possível definir uma etapa de teste mais elaborada para essas situações. Entretanto, como a técnica de definição de i valores iniciais torna o método proposto praticamente imune a um erro de convergência em situações pertencentes ao caso (b), a implementação de tal etapa não é estudada neste trabalho.

O fato de o método de localização desenvolvido convergir para a solução correta em situações em que as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ apresentem mais de um ponto de interseção merece um destaque. Em casos desse tipo, o método proposto consegue definir uma única estimativa, e em todos os casos estudados neste trabalho, essa estimativa é a correta. Tal fato ocorre porque além de utilizar as funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ como variável de busca, a técnica proposta considera a característica de inclinação dessas duas curvas para estimar a localização da falta na LT. Em outras palavras, trata-se de um método numérico que utiliza uma filosofia baseada no conhecimento da característica de variação da tensão ao longo de uma LT.

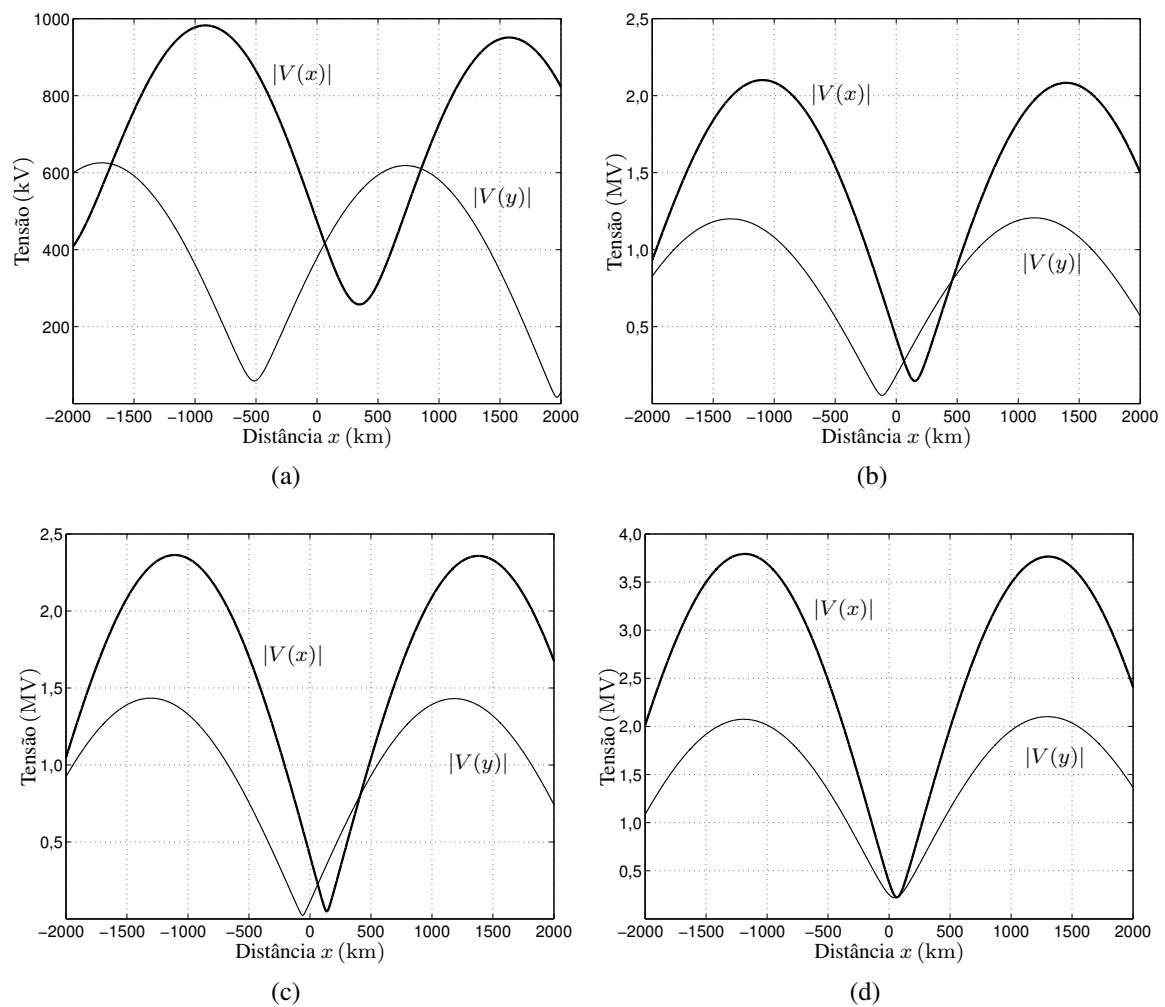


Figura 5.17: Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ calculadas para $-2000 \leq x \leq 2000$ km, considerando condições de falta com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$). (a) Falta fase-terra. (b) Falta fase-fase. (c) Falta fase-fase-terra. (d) Falta trifásica não-sólida.

5.6.5 Comparação Entre as Características das Funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ Para os Possíveis Tipos de Falta

Para fins de comparação, esta seção realiza um estudo cujo objetivo é esclarecer diferenças existentes entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para os diferentes tipos de falta. Para tal, simula-se no ATP a LT sob condição de falta padrão, variando apenas o tipo de falta. Como discutido anteriormente, a função $|V(x)|$ só é válida para $0 \leq x \leq d$ e a função $|V(y)|$, para $0 \leq y \leq \ell - d$. Apesar disso, as funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são calculadas neste estudo a partir dos fasores dos terminais S e R da LT utilizando valores de x na faixa entre -2000 e 2000 km. A Figura 5.17 apresenta os resultados obtidos. Apesar de a maior parte dessa faixa de valores de x não apresentar um significado físico, as curvas resultantes desse estudo auxiliam a entender por que uma falta trifásica não-sólida é a mais perigosa para a convergência do

método proposto, e de qualquer outra técnica que forneça uma estimativa da distância d a partir somente das magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$. O primeiro ponto a se observar é que as curvas sempre definem mais de uma solução, independentemente do tipo de falta. Entretanto, geralmente apenas uma dessas soluções pertence à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. O método desenvolvido sempre converge para uma solução localizada na faixa entre $0 \leq x \leq \ell$, pois a busca é realizada a partir das características de $|V(x)|$ e $|V(y)|$ calculadas a partir dos fasores dos terminais S e R da linha. Como discutido anteriormente, a única situação de risco ocorre quando temos duas soluções x_1 e x_2 próximas localizadas dentro da faixa $0 \leq x \leq \ell$. Tal fato ocorre para a falta trifásica não-sólida porque os pontos de mínimo de $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são quase coincidentes, como mostra a Figura 5.17(d), gerando soluções x_1 e x_2 de valores bastante próximos e fazendo com que as parcelas das curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ que não apresentam um decaimento quase linear sejam utilizadas pelo método proposto.

5.7 Fluxograma

A Figura 5.18 apresenta um fluxograma do método de localização de faltas proposto neste trabalho. Alguns pontos desse fluxograma merecem destaque. No passo 1, é necessário obter na realidade as informações relativas às fases A, B e C dos fasores de tensão e corrente medidos nos terminais S e R da linha e os valores de seqüências positiva e zero dos parâmetros R_u , L_u e C_u . No passo 2, a constante de propagação γ_m e a impedância característica Z_{cm} são calculadas através de (2.19) e (2.20), respectivamente. O teste do passo 4 é realizado através de (5.39) e (5.40), e serve para verificar se a falta ocorrida é ou não trifásica. Caso sim, utiliza-se na etapa 5 a técnica de definição de vários valores iniciais (três) apresentada na Seção 5.6.3, uma vez que o método proposto pode convergir para a solução incorreta na localização de faltas trifásicas não-sólidas [caso (b), ver Seção 5.6.2]. Se a falta não for trifásica, apenas uma estimativa inicial é calculada. Vale lembrar que essas estimativas iniciais $d'(0)$ obtidas no passo 5 são calculadas através de (5.15) a (5.19). No passo 7, utilizam-se (5.23), (5.24), (5.25) e (5.26) para calcular os coeficientes a_1 , a_2 , b_1 e b_2 , respectivamente.

5.8 Conclusões

Este capítulo apresentou de forma detalhada o método de localização de faltas proposto neste trabalho. Primeiramente, o princípio básico utilizado na localização de faltas em LTs monofásicas foi apresentado. Através da aplicação da técnica de decomposição em componentes simétricos, esse princípio foi estendido para o caso de LTs trifásicas. Outro ponto importante discutido é como a variação quase linear da magnitude da tensão ao longo de uma LT faltosa nos permitiu desenvolver um método iterativo baseado em fasores não-sincronizados dedicado exclusivamente à localização de faltas em LTs. Para o melhor enten-

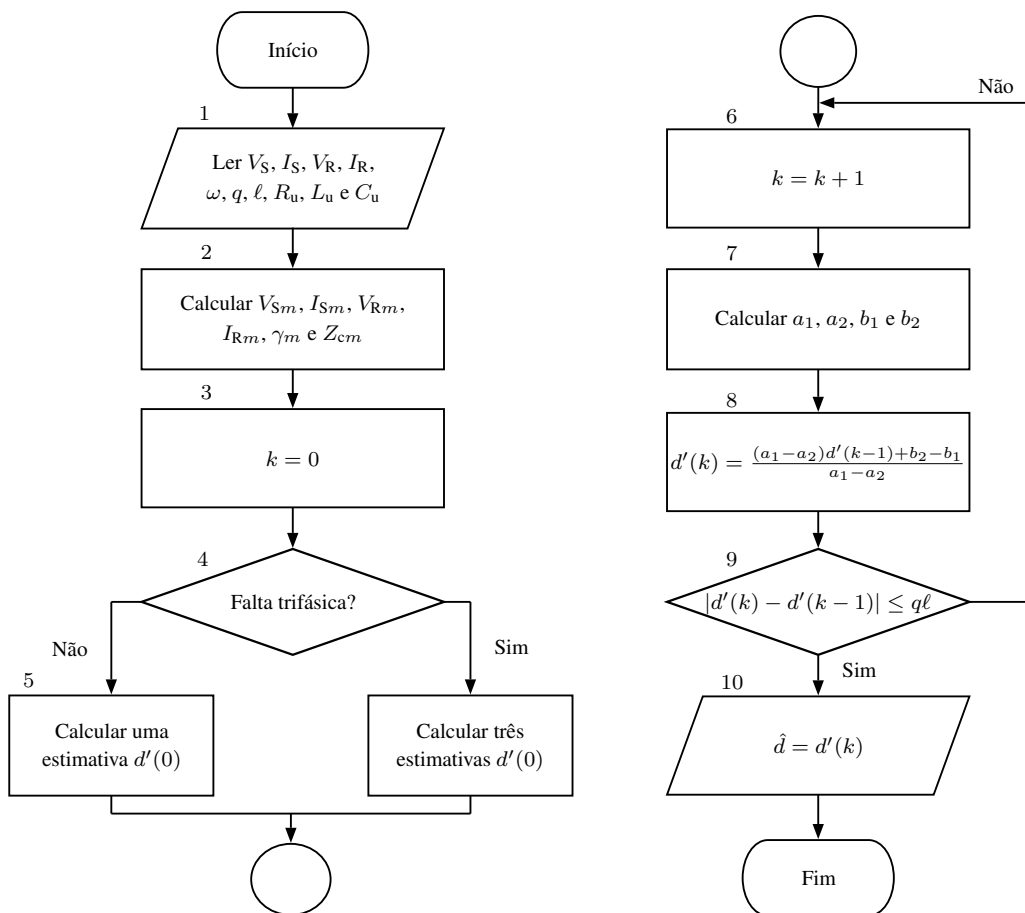


Figura 5.18: Fluxograma simplificado do método de localização de faltas proposto.

dimento da técnica desenvolvida, o processo de localização de uma falta considerada como padrão neste trabalho foi apresentado passo a passo. Outro ponto importante discutido neste capítulo é a possibilidade de qualquer método de localização baseado apenas na magnitude da tensão ao longo da LT sofrer um erro de convergência devido à possível existência de duas soluções localizadas entre o início e o final da LT. No caso do método aqui proposto, apenas faltas trifásicas não-sólidas podem levar a um erro de convergência. Para evitar tal situação indesejável, uma técnica auxiliar foi desenvolvida e testada com sucesso.

Capítulo 6

Resultados Obtidos

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em diversos testes experimentais realizados com o método de localização de faltas em LTs descrito no Capítulo 5. Inicialmente, a Seção 6.1 descreve as condições utilizadas nas simulações realizadas com o *software* ATP. As Seções 6.2 a 6.5 apresentam os resultados de testes de avaliação da robustez do algoritmo proposto frente a diferentes condições de falta que podem ser encontradas em situações práticas. Para isso, a LT da Seção 5.3 é simulada considerando diferentes valores de localização do ponto de falta (Seção 6.2), de resistência de falta (Seção 6.3) e de carga na LT (Seção 6.4). Já a Seção 6.5 apresenta um estudo mais elaborado do desempenho do algoritmo desenvolvido perante a diferentes tipos de falta na LT, uma vez que, de acordo com o estudo apresentado no Capítulo 5, o tipo de falta é o parâmetro mais propenso a causar erros de convergência no método de localização de faltas desenvolvido. Para mostrar que o método proposto não é eficiente apenas na localização de faltas ocorridas no sistema de potência definido na Seção 5.3, a Seção 6.6 apresenta os resultados obtidos na localização de faltas ocorridas em uma LT cujos parâmetros são típicos de LTs da Eletrosul. A Seção 6.7 compara o método proposto neste trabalho com o método de Johns/Jamali apresentado em [53], através da verificação da magnitude do erro de localização de falta dessas duas técnicas em condições de falta que apresentem fasores sincronizados e em outras cujos fasores dos dois terminais da linha não estão sincronizados. A Seção 6.8 apresenta um estudo de sensibilidade do método proposto frente a erros nos fasores de frequência fundamental e nos parâmetros da LT. A Seção 6.9 apresenta os resultados obtidos na localização de quatro condições de falta reais. Por fim, a Seção 6.10 apresenta as conclusões deste capítulo.

6.1 Condições Adotadas nas Simulações

Esta seção descreve o procedimento adotado na realização da maioria dos testes experimentais apresentados ao longo deste capítulo. Primeiramente, simula-se o sistema de potência definido na Seção 5.3 com o auxílio do *software* ATP, que é capaz de estimar auto-

maticamente os fasores de tensão e corrente em qualquer ponto da LT. Neste trabalho, o que importa são os fasores de tensão e corrente de pós-falta medidos nos terminais S e R da LT (das três fases). De maneira similar ao estudo apresentado na Seção 5.3, essas simulações são realizadas em regime permanente para que os fasores calculados pelo ATP (magnitude e fase) possam ser considerados absolutamente corretos. Como os parâmetros da linha de transmissão são todos conhecidos, esse cenário representa a condição ideal para a aplicação do método proposto: fasores dos terminais S e R e parâmetros da LT com erros nulos. Sendo assim, caso não haja um erro de convergência, os erros de localização de falta das estimativas obtidas nos testes realizados considerando condições ideais também devem ser nulos, a menos de pequenos erros numéricos ocasionados pelos fatores (i), (ii) e (iii) descritos na Seção 5.5. Em todos os experimentos realizados neste capítulo, adota-se $q = 0,001$ para o critério de parada definido por (5.29). Como já mencionado, as fases dos fasores de tensão e corrente do terminal R da linha são acrescidas, na maioria dos casos estudados, de um ângulo $\delta = 45^\circ$ a fim de simular medidas não-sincronizadas. Feito isso, o método de localização de faltas proposto é aplicado a fim de se obter uma estimativa da localização de falta \hat{d} cujo erro, definido na Seção 2.1, é dado por

$$\epsilon = \frac{\hat{d} - d}{\ell} \times 100. \quad (6.1)$$

Apesar de o erro de localização de falta ϵ ser o parâmetro de maior relevância na avaliação do desempenho de um algoritmo de localização de faltas, também é interessante verificar o número de iterações de que o algoritmo desenvolvido necessita para obter a convergência bem como as características das curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dos casos estudados. Assim, as condições de falta que apresentem curvas $|V(x)|$ e/ou $|V(y)|$ com comportamentos incomuns são destacadas ao longo do texto.

Primeiramente, considere novamente a condição de falta padrão: falta fase-terra com resistência de falta $R_F = 10 \Omega$ localizada a uma distância $d = 64,4 \text{ km}$ ($\bar{d} = 0,4$) do terminal local da LT. A localização dessa falta utilizando o método proposto é apresentada detalhadamente na Seção 5.5, cujos resultados obtidos são resumidos na Tabela 6.1. Pode-se notar que o valor numérico da estimativa \hat{d} é bastante próximo do real $d = 64,4 \text{ km}$, resultando em um erro de localização de falta ϵ com ordem de grandeza de 10^{-4} . Essa falta é localizada em duas iterações e as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ apresentam um decaimento quase linear ao longo de toda a LT (Figura 5.5), que é a característica mais comumente verificada nos testes realizados nesta pesquisa.

Ao longo deste capítulo, deseja-se avaliar a robustez do método de localização de faltas proposto neste trabalho frente a diferentes condições de falta que podem ser encontradas em situações práticas. Tal estudo é realizado alterando os seguintes parâmetros em relação às condições definidas para a falta padrão:

Tabela 6.1: Resultados obtidos para o sistema de potência sob condição de falta padrão

d (km)	\bar{d}	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
64,4	0,4	64,3990	$-6,1633 \times 10^{-4}$	2

- localização d do ponto de falta F (Seção 6.2);
- valor da resistência de falta R_F (Seção 6.3);
- condição de carga na LT (Seção 6.4);
- tipo de falta ocorrida na LT (Seção 6.5).

Como o método de localização de faltas proposto neste trabalho é independente das impedâncias das fontes conectadas aos terminais da linha (Z_S e Z_R), o efeito da variação de tais parâmetros na magnitude do erro de localização de falta não necessita ser estudado.

6.2 Estudo da Variação da Localização da Falta

Este experimento busca averiguar o desempenho do algoritmo de localização de faltas desenvolvido assumindo diferentes posições para o ponto de falta F. Como discutido no Capítulo 4, essa é uma das possíveis fontes de erro (FEs) dos métodos baseados em fasores de um terminal, cujos erros tendem a ser maiores para faltas localizadas próximas ao terminal remoto da linha. Para verificar a influência desse parâmetro na magnitude do erro de localização de falta, consideram-se faltas localizadas desde o terminal local S ($\bar{d} = 0$) até o terminal remoto R ($\bar{d} = 1,0$), variando a distância normalizada \bar{d} da falta em passos de 0,2, que corresponde a 32,2 km para a LT aqui estudada.

A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos nos testes realizados. Em todos os casos estudados, o algoritmo requer apenas duas iterações para convergir e apresenta um erro de localização de falta de magnitude desprezável, da ordem de grandeza de 10^{-3} nos piores casos. Portanto, pode-se concluir até então que o desempenho do método proposto não é afetado significativamente pela localização do ponto de falta na LT.

A Figura 6.1 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para a condição de falta com $d = 32,2$ km ($\bar{d} = 0,2$). Note que a curva $|V(x)|$ apresenta uma inclinação levemente menos acentuada a partir de $x \cong 120$ km, mas ainda assim pode ser considerada como tendo um decaimento quase linear ao longo de toda a LT. Esse tipo de característica é relativamente comum e não traz maiores problemas para a convergência do algoritmo desenvolvido. É importante lembrar que na realidade essa alteração de característica não possui significado físico, uma vez que a curva calculada $|V(x)|$ só é válida para $0 \leq x \leq d$, que nesse caso corresponde a $0 \leq x \leq 32,2$ km; de maneira análoga, a curva $|V(y)|$ só é válida para $32,2 \leq x \leq 161$ km.

Tabela 6.2: Resultados obtidos para condições de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e diferentes localizações do ponto de falta F

d (km)	\bar{d}	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0	0,0	$7,8466 \times 10^{-4}$	$4,8736 \times 10^{-4}$	2
32,2	0,2	32,1994	$-3,1727 \times 10^{-4}$	2
64,4	0,4	64,3990	$-6,1633 \times 10^{-4}$	2
96,6	0,6	96,5977	$-1,4129 \times 10^{-3}$	2
128,8	0,8	128,795	$-2,8262 \times 10^{-3}$	2
161,0	1,0	160,992	$-4,7531 \times 10^{-3}$	2

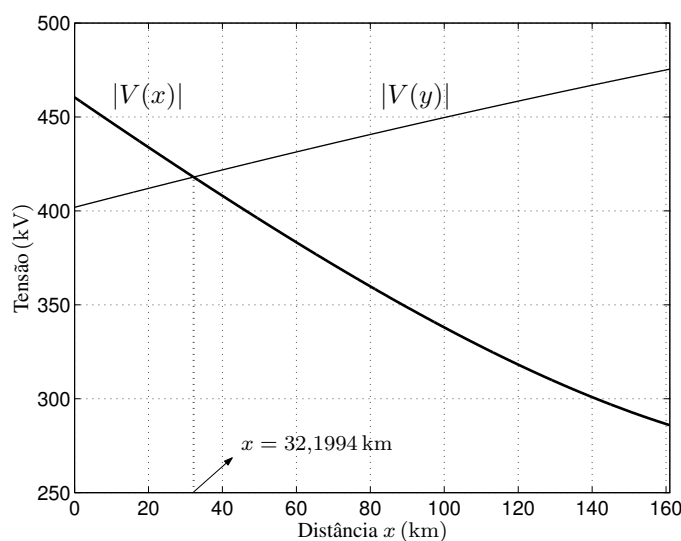


Figura 6.1: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 32,2$ km ($\bar{d} = 0,2$).

A condição de falta com $d = 0$ (falta localizada no terminal local) é a mesma estudada em detalhes na Seção 5.6.1. As curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ desse caso são as mostradas na Figura 5.12, que definem duas possíveis soluções para (5.10) [caso (a)] pertencentes à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$:

$$x_1 = 8,2007 \times 10^{-4} \text{ km} \quad \text{e} \quad x_2 = 143,24 \text{ km}.$$

Apesar disso, o método proposto converge para a solução correta x_1 , fornecendo uma estimativa com erro de localização de falta desprezável, da ordem de grandeza de 10^{-4} , como mostra a Tabela 6.2. Note que neste caso há uma diferença perceptível entre os valores de x_1 ($8,2007 \times 10^{-4}$ km) e \hat{d} ($7,8466 \times 10^{-4}$ km). Tal fato ocorre devido ao baixo valor da solução correta x_1 . Caso fosse importante solucionar tal situação, bastaria adotar um q menor para

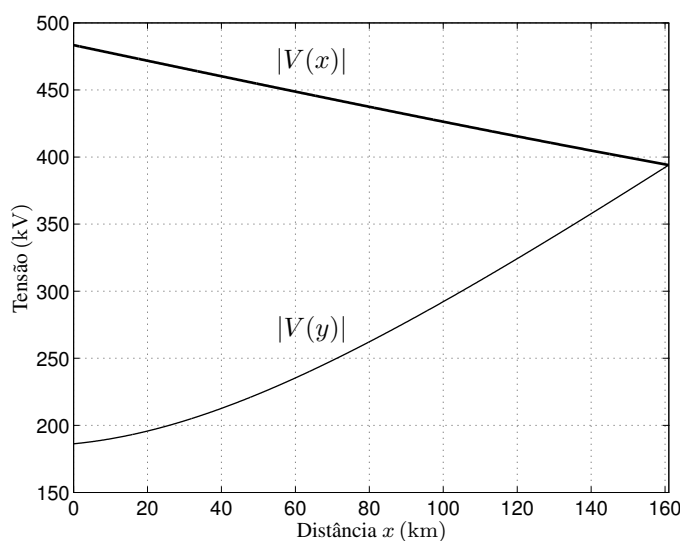


Figura 6.2: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 161 \text{ km}$ ($\bar{d} = 1,0$).

o critério de parada definido por (5.29). Por exemplo, para $q = 1 \times 10^{-4}$ (como mostrado na Seção 6.1, o valor de q utilizado em todos os testes deste trabalho é 1×10^{-3}), o método proposto exige uma iteração a mais para convergir (três em vez de duas), fornecendo uma estimativa $\hat{d} = 8,1941 \times 10^{-4} \text{ km}$, que é praticamente igual a x_1 .

Pode-se pensar que esse tipo de situação em que se verifica a existência de duas soluções para (5.10) que se enquadram no caso (a) ocorra sempre que a falta estiver localizada nos pontos extremos da LT. Tal regra não é verdadeira, pois para a condição de falta fase-terra localizada no terminal remoto da linha ($\bar{d} = 1,0$), essa característica não é verificada, como mostra a Figura 6.2. Nesse caso, existe apenas um ponto de interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ pertencente à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$ (em $x = 160,992 \text{ km}$). Note na Figura 6.2 que a curva $|V(x)|$ apresenta uma característica quase linear ao longo de toda a LT; a curva $|V(y)|$ só apresenta uma inclinação levemente menor para valores de x menores do que 40 km.

As condições de falta com distância \bar{d} igual a 0,6 e 0,8 não apresentam curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ que necessitem ser aqui destacadas. A condição de falta com $\bar{d} = 0,4$ corresponde à falta padrão estudada detalhadamente na Seção 5.5, cujas curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são apresentadas na Figura 5.5.

6.3 Estudo da Variação da Resistência de Falta

Esta seção apresenta os resultados de testes de avaliação considerando diferentes valores de resistência de falta R_F . Como mostrado no Capítulo 4, esse é um dos parâme-

Tabela 6.3: Resultados obtidos para condições de falta fase-terra com $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$) e diferentes valores de resistência de falta

R_F (Ω)	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0	64,3989	$-6,8228 \times 10^{-4}$	2
20	64,3988	$-7,2610 \times 10^{-4}$	2
40	64,3977	$-1,4234 \times 10^{-3}$	2
60	64,3957	$-2,6546 \times 10^{-3}$	3
80	64,3929	$-4,3573 \times 10^{-3}$	3
100	64,3896	$-6,4593 \times 10^{-3}$	3

tros que mais interferem no desempenho dos métodos de localização de faltas baseados em fasores de um único terminal devido à necessidade de adoção de suposições que permitam eliminar o efeito de R_F (parâmetro desconhecido) na modelagem matemática utilizada pelo processo de localização de falta. Como regra geral, quanto maior for a resistência de falta, maior o erro de localização de falta dessa classe de algoritmos. Para verificar a robustez do método desenvolvido a esse importante parâmetro, simula-se a LT da Figura 5.4 variando o valor da resistência de falta desde zero (falta sólida) até 100Ω (falta de alta resistência), considerando passos de 20Ω . Como a modelagem matemática adotada neste trabalho, descrita na Seção 5.1, é independente de R_F , tal parâmetro não deve influenciar significativamente o desempenho do método proposto.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos neste estudo, através da qual dois efeitos podem ser percebidos. Um ponto a ser observado é que a magnitude do erro de localização de falta ϵ aumenta levemente com o aumento da resistência de falta R_F . Além disso, para as faltas de maiores resistências (60, 80 e 100Ω), o método proposto requer três iterações em vez de apenas duas para obter a convergência. Vale aqui informar que nenhuma das condições de falta estudadas nesta seção resulta em mais de uma solução para (5.10) dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$.

A Figura 6.3 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para a condição de falta fase-terra com $R_F = 100 \Omega$. O estudo mais detalhado dessa condição de falta auxilia a entender por que a técnica desenvolvida requer mais iterações, nesse caso três, para obter a convergência nessas situações que apresentam maiores valores de resistência de falta. Note que a curva $|V(y)|$ na Figura 6.3 apresenta uma característica que se assemelha mais a uma parábola do que propriamente a uma reta, diferentemente de $|V(x)|$, que possui um decaimento quase linear ao longo de toda a LT. Sendo assim, a reta V_2 utilizada para a definição da estimativa de localização de falta inicial do algoritmo não representa de forma tão precisa a curva $|V(y)|$, como mostra a Figura 6.4(a). Conseqüentemente, o ponto de interseção entre as retas V_1 e V_2

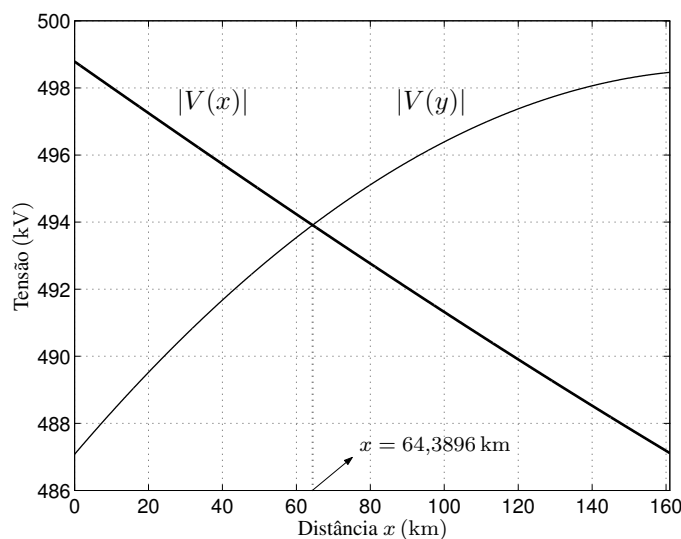


Figura 6.3: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ ao longo da linha de transmissão para a condição de falta fase-terra com $R_F = 100 \Omega$ e $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$).

define uma estimativa de localização de falta inicial

$$d'(0) = 24,8240 \text{ km} \quad (6.2)$$

que, diferentemente das estimativas iniciais obtidas nos casos anteriores, apresenta um valor bastante distante do valor correto da distância d (para a falta padrão, por exemplo, $d'(0) = 61,5353$ km). Para fins de comparação, verifique na Tabela 6.4 a grande diferença da primeira estimativa de localização de falta desse caso com $R_F = 100 \Omega$ em relação à obtida para a condição de falta sólida. Entretanto, apesar de a estimativa inicial dada por (6.2) ser bastante pobre, as retas V_1 e V_2 na primeira iteração deste exemplo de falta com $R_F = 100 \Omega$ definem uma estimativa bem melhor [ver Figura 6.4(b)], de valor

$$d'(1) = 61,1379 \text{ km}. \quad (6.3)$$

Pode-se notar que a diferença dessa estimativa de localização de falta $d'(1)$ em relação à estimativa $d'(1)$ obtida para a condição de falta sólida já é bem menor do que a diferença entre as estimativas iniciais $d'(0)$ desses dois casos (ver Tabela 6.4). Além disso, apesar de necessitar de uma iteração a mais para convergir, o método proposto também fornece uma estimativa de localização de falta com erro desprezável para esse caso de falta de alta resistência.

Vamos tratar agora da maior magnitude do erro de localização de falta obtido para a condição de falta com $R_F = 100 \Omega$ que, apesar de ser de valor desprezável, é em torno de dez vezes maior em relação ao obtido para a condição de falta sólida (ver Tabela 6.3). Pode-se

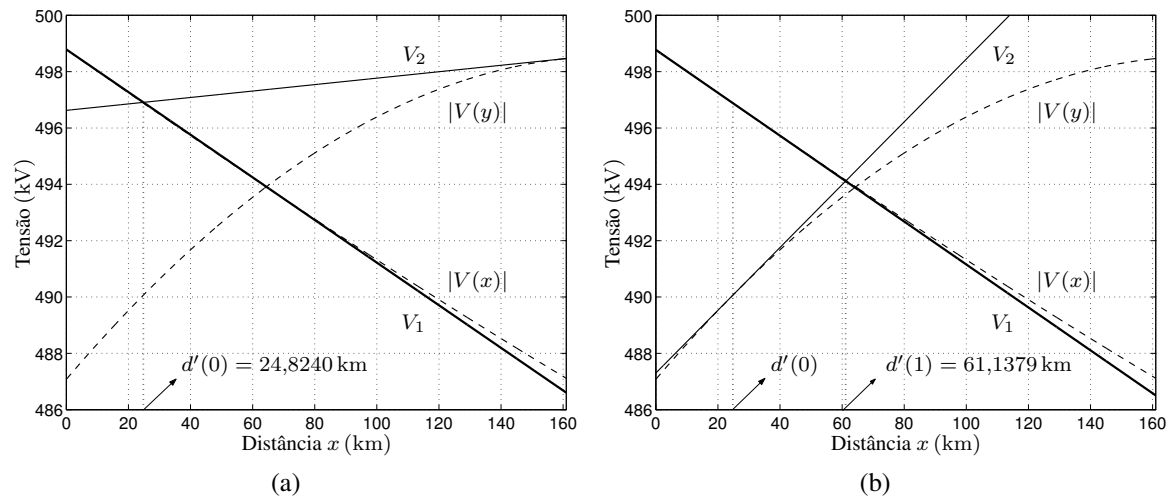


Figura 6.4: Retas V_1 e V_2 para a condição de falta fase-terra com $R_F = 100 \Omega$ e $d = 64,4$ km ($\vec{d} = 0,4$). (a) Etapa de definição do valor inicial $d'(0)$. (b) Primeira iteração.

Tabela 6.4: Estimativas de localização de falta para condições de falta fase-terra com $R_F = 0$ e $R_F = 100 \Omega$, ambas com $d = 64,4$ km ($\vec{d} = 0,4$)

Iteração k	$d'(k)$ para $R_F = 0$	$d'(k)$ para $R_F = 100 \Omega$
0	63,2866 km	24,8240 km
1	64,3988 km	61,1379 km
2	64,3989 km	64,3637 km
3	–	64,3896 km

verificar na Figura 6.3 que o ponto de interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para essa condição de falta com $R_F = 100 \Omega$ é

$$x = 64,3896 \text{ km} \quad (6.4)$$

em vez de $x = 64,4$ km, que é o valor da distância d utilizado na simulação dessa condição de falta no ATP. Portanto, a estimativa de localização de falta $\hat{d} = 64,3896$ km (Tabela 6.3) é praticamente igual ao ponto de interseção definido por (6.4) (a diferença só é perceptível após a quinta casa decimal). Esse caso deixa evidente que a maior parte do erro de localização de falta não ocorre devido ao processo de aproximações sucessivas desenvolvido, e sim devido aos fatores (i) e (ii) descritos na Seção 5.5, uma vez que o algoritmo converge para o valor definido pela interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$, a menos de uma pequena diferença numérica causada pela necessidade de adoção do critério de parada [fator (iv)] definido por (5.29). Tal conclusão é válida para praticamente todas as demais condições de falta simuladas neste trabalho de pesquisa.

6.4 Estudo da Variação da Carga na Linha de Transmissão

O objetivo deste experimento é analisar a robustez do algoritmo desenvolvido em relação à variação da carga na LT. Para simular tais variações de carga, utiliza-se a estratégia de alterar a magnitude (grandeza relacionada principalmente ao fluxo de potência reativa na LT) e a fase (grandeza relacionada principalmente ao fluxo de potência ativa na LT) das tensões das fontes conectadas aos terminais S e R da linha (E_S e E_R), procedimento semelhante ao adotado em [98] e [104]. Neste trabalho, cinco diferentes condições de carga são consideradas:

- i) fluxo de potência normal, para o qual a magnitude de E_R é 500 kV e a fase de E_R é -10° (caso da falta padrão);
- ii) a magnitude de E_R é alterada para 450 kV (redução de 10 %);
- iii) a magnitude de E_R é alterada para 550 kV (aumento de 10 %);
- iv) a fase de E_R é alterada para -5° (defasagem angular entre as tensões das fontes E_S e E_R diminui 5°);
- v) a fase de E_R é alterada para -15° (defasagem angular entre as tensões das fontes E_S e E_R aumenta 5°).

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para as cinco condições de carga na LT consideradas neste estudo. A exemplo do que ocorre nos casos estudados anteriormente, o erro de localização de falta ϵ para essas condições de falta também é de valor desprezável, da ordem de grandeza de 10^{-3} no pior caso [condição de carga (v)]. Assim, pode-se considerar que o método proposto não é significativamente afetado pela variação de carga na LT. A Figura 6.5 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ nos casos avaliados, exceto da condição de carga (i), estudada em detalhes na Seção 5.5. Pode-se verificar que tais curvas apresentam um decaimento praticamente linear ao longo de toda a LT. Além disso, os valores das estimativas de localização de falta \hat{d} mostradas na Tabela 6.5 correspondem aos respectivos pontos de interseção dos gráficos da Figura 6.5. Isso comprova que, a menos de um pequeno erro devido ao critério de parada, o método de aproximações sucessivas desenvolvido converge corretamente para o ponto definido pela interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$.

6.5 Estudo da Variação do Tipo de Falta

Este estudo busca verificar a robustez do método de localização de faltas proposto quanto à variação do tipo de falta ocorrida na LT. Para tal, adotando a mesma metodologia das Seções 6.2 a 6.4, simula-se o sistema de potência considerando os parâmetros da falta

Tabela 6.5: Resultados obtidos considerando a ocorrência da falta padrão com diferentes condições de carga na linha de transmissão

Condição	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
(i)	64,3990	$-6,1633 \times 10^{-4}$	2
(ii)	64,3989	$-6,4152 \times 10^{-4}$	2
(iii)	64,3990	$-5,8881 \times 10^{-4}$	2
(iv)	64,3997	$-1,7061 \times 10^{-4}$	2
(v)	64,3982	$-1,0658 \times 10^{-3}$	2

Tabela 6.6: Resultados obtidos para condições de falta de diferentes tipos com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$)

Tipo de falta	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
Fase-terra	64,3990	$-6,1634 \times 10^{-4}$	2
Fase-fase	64,3998	$-7,1973 \times 10^{-5}$	2
Fase-fase-terra	64,3996	$-2,0282 \times 10^{-4}$	2
Trifásica	64,4094	$5,8999 \times 10^{-3}$	3

padrão ($R_F = 10 \Omega$ e $d = 64,4$ km), variando apenas o tipo de falta ocorrido na linha. Na realidade, a condição de falta fase-terra é a mesma discutida em detalhes na Seção 5.5 (falta padrão). Como já mencionado, o método de localização de faltas desenvolvido sempre utiliza o circuito de seqüência positiva da LT, tornando desnecessária uma etapa de classificação do tipo de falta. A Tabela 6.6 apresenta os resultados obtidos nesses testes, de onde se pode notar que o erro de localização de falta para os quatro tipos possíveis de falta estudados é desprezável.

Entretanto, avaliar o desempenho do método em questão considerando uma falta de qualquer tipo localizada apenas no ponto $x = 64,4$ km não é suficiente. Como mostrado na Seção 5.6, podem existir condições de falta em que (5.10) apresenta duas possíveis soluções dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Essas situações apresentam características diferentes de acordo com o tipo de falta, sendo classificadas como caso (a) (faltas fase-terra, fase-fase ou fase-fase-terra) ou caso (b) (faltas trifásicas não-sólidas). Assim, vamos estender esse estudo, aplicando o método proposto na localização de faltas de todos os tipos ocorridas desde o terminal local ($\bar{d} = 0$) até o terminal remoto ($\bar{d} = 1,0$), variando a distância \bar{d} da falta em passos de 0,2.

O desempenho do método proposto considerando a ocorrência de faltas fase-terra localizadas ao longo da LT já é estudado na Seção 6.2, na qual verifica-se que apenas para a condição de falta localizada no terminal local ($\bar{d} = 0$) existem duas soluções para (5.10) [situação pertencente ao caso (a)]. Apesar disso, o algoritmo converge corretamente em to-

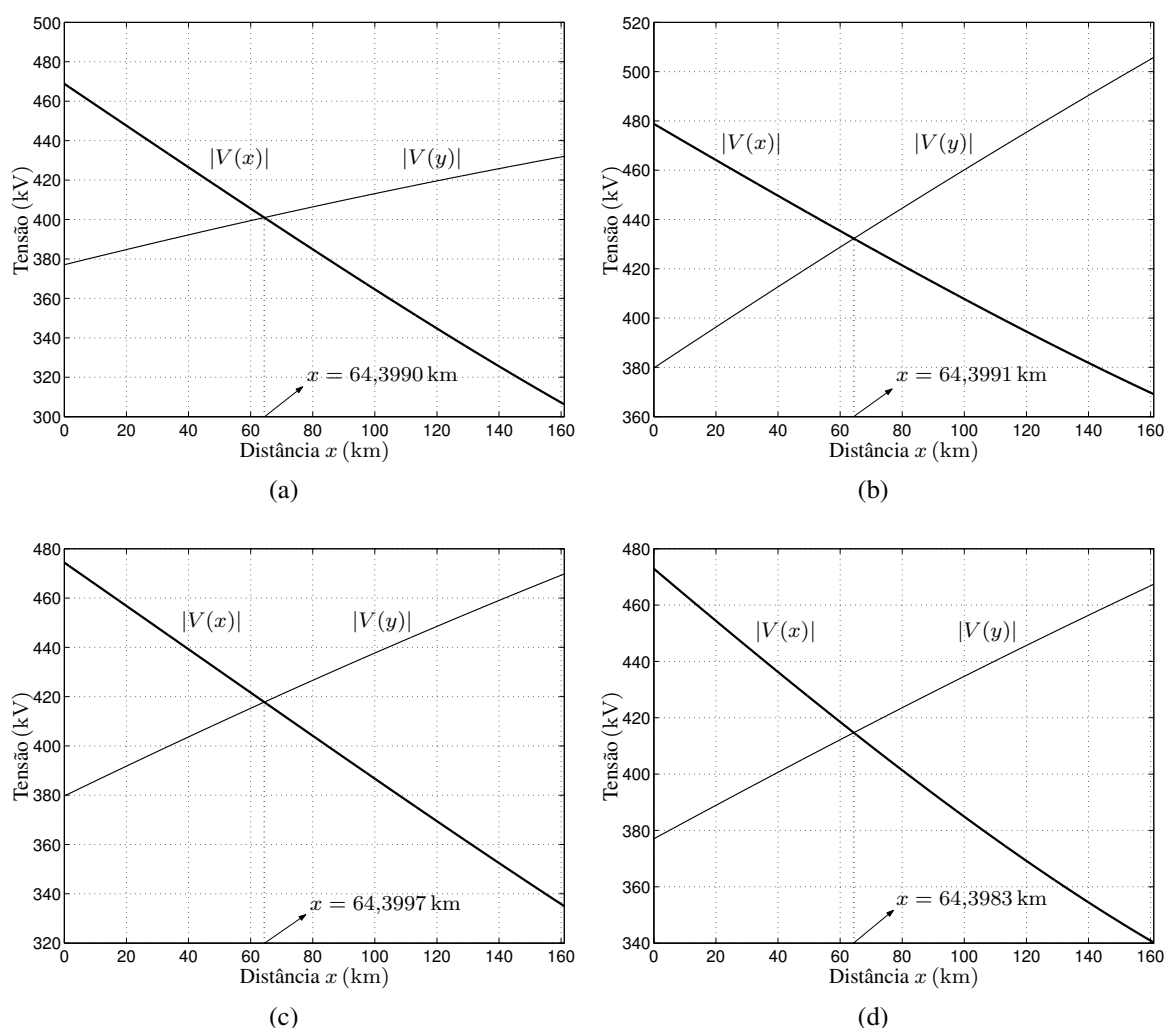


Figura 6.5: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta padrão (falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ e $d = 64,4$ km), variando apenas a condição de carga na linha de transmissão. (a) Condição de carga (ii). (b) Condição de carga (iii). (c) Condição de carga (iv). (d) Condição de carga (v).

das as situações consideradas, apresentando um erro de localização de falta de magnitude insignificante e convergindo em duas iterações em todas as situações consideradas (ver Tabela 6.2).

A Tabela 6.7 apresenta os resultados obtidos na localização de faltas fase-fase ocorridas ao longo da LT. Pode-se notar que em todos os casos estudados, o método desenvolvido apresenta um erro de localização de falta desprezável, convergindo em apenas uma iteração nas situações consideradas. A Figura 6.6 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dos casos que apresentam as curvas com características mais incomuns. Novamente, a condição de falta localizada no terminal local [Figura 6.6(a)] resulta em duas soluções para (5.10) pertencentes à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Apesar disso, o método converge para a solução correta sem problemas, uma vez que essa é uma situação que se enquadra no caso (a): apenas uma das

Tabela 6.7: Resultados obtidos para condições de falta fase-fase com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$2,3719 \times 10^{-3}$	$1,4732 \times 10^{-3}$	1
32,2 [0,2]	32,2007	$4,7065 \times 10^{-4}$	1
64,4 [0,4]	64,3998	$-7,2028 \times 10^{-5}$	1
96,6 [0,6]	96,5986	$-8,4686 \times 10^{-4}$	1
128,8 [0,8]	128,796	$-1,8840 \times 10^{-3}$	1
161,0 [1,0]	160,995	$-3,0835 \times 10^{-3}$	1

curvas, nesse caso $|V(x)|$, não apresenta um decaimento quase linear ao longo de toda a LT, gerando soluções x_1 e x_2 distantes uma da outra. As demais situações estudadas resultam em uma única solução para (5.10). As curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ das condições de falta com \bar{d} igual a 0,2, 0,8 e 1,0 são destacadas na Figura 6.6. Note que em todos esses casos uma das curvas não apresenta um decaimento linear ao longo de toda a linha. Apesar disso, essas condições de falta não resultam em duas possíveis soluções para (5.10) na faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Além disso, é interessante constatar que o algoritmo realmente converge para a interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$, como pode se ver através da comparação entre os pontos de interseção destacados na Figura 6.6 e os valores das estimativas \hat{d} apresentadas na segunda coluna da Tabela 6.7.

A Tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos na localização de faltas fase-fase-terra localizadas ao longo da LT. Assim como no caso anterior, o erro de localização de falta é desprezável em todos os casos estudados. Quanto ao número de iterações, as condições de falta com \bar{d} igual a 0,6 e 1,0 convergem em apenas uma iteração; os demais casos resultam em duas iterações. A Figura 6.7 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dos casos que apresentam as curvas com características mais incomuns. Nesse estudo, as condições de falta fase-fase-terra localizadas no terminal local ($\bar{d} = 0$) e no terminal remoto ($\bar{d} = 1,0$) criam situações em que existem duas soluções para (5.10) pertencentes à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Note que esses dois casos se enquadram como situações do caso (a), pois apenas uma das curvas ($|V(x)|$ para a condição de falta com $\bar{d} = 0$ e $|V(y)|$ para a condição de falta com $\bar{d} = 1,0$) não apresenta um decaimento praticamente linear ao longo de toda a LT. Logo, as soluções x_1 e x_2 são distantes uma da outra nessas duas situações. Apesar de as condições de falta com \bar{d} igual a 0,2 e 0,8 também apresentarem uma das curvas com decaimento fortemente não-linear [Figuras 6.7(b) e 6.7(c), respectivamente], elas não resultam em duas soluções para (5.10) dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. As condições de falta com \bar{d} igual a 0,4 e 0,6 apresentam curvas com decaimento praticamente linear ao longo de toda a LT, não sendo aqui destacadas.

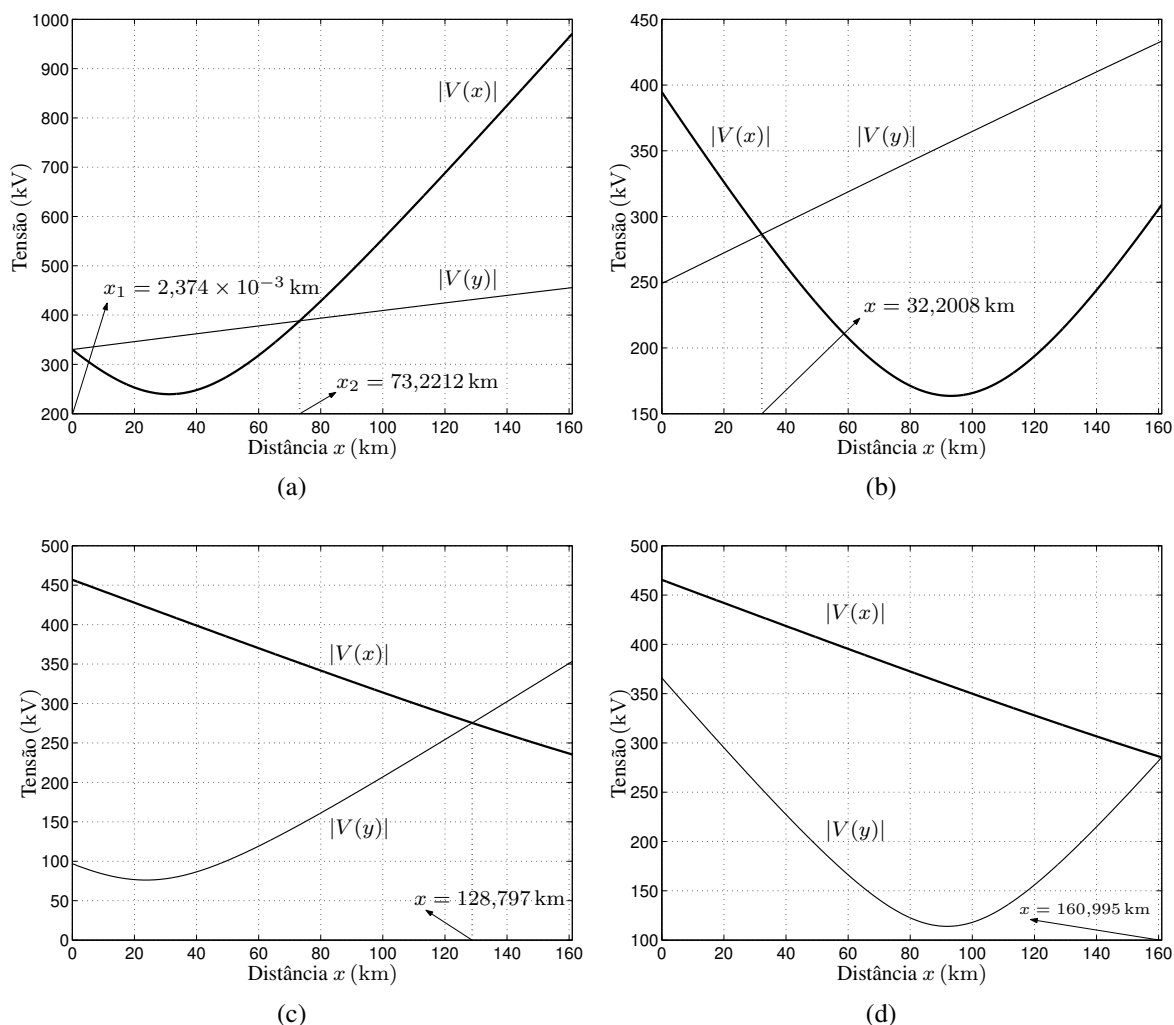


Figura 6.6: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 32,2$ km ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 128,8$ km ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 161$ km ($\bar{d} = 1,0$).

A Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos na localização de faltas trifásicas com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da LT. Como mostra a Seção 5.6, esse é o tipo de falta que oferece maiores riscos à convergência do método de localização de faltas proposto, pois pode resultar em situações que se enquadram no caso (b) (curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ sem a característica de decaimento quase linear ao longo de toda a LT). Os resultados da Tabela 6.9 são obtidos após a aplicação direta do algoritmo apresentado na Seção 5.5, sem a utilização da técnica de definição de i valores iniciais apresentada na Seção 5.6.3. Note que na metade dos casos estudados, destacados em negrito na Tabela 6.9, o algoritmo desenvolvido apresenta problemas de convergência. Como mencionado anteriormente, esses casos problemáticos geralmente necessitam de mais de três iterações para convergir, que é o valor máximo de iterações da grande maioria dos casos em que um erro de convergência não é

Tabela 6.8: Resultados obtidos para condições de fase-fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$7,9963 \times 10^{-4}$	$-1,2445 \times 10^{-4}$	2
32,2 [0,2]	32,1997	$-1,3484 \times 10^{-4}$	2
64,4 [0,4]	64,3996	$-2,0282 \times 10^{-4}$	2
96,6 [0,6]	96,5992	$-4,4768 \times 10^{-4}$	1
128,8 [0,8]	128,798	$-9,4632 \times 10^{-4}$	2
161,0 [1,0]	160,996	$-2,2297 \times 10^{-3}$	1

Tabela 6.9: Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão, sem a utilização da técnica de definição de i valores iniciais. As linhas em destaque representam os casos em que ocorre erro de convergência

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	3,0049	1,8657	5
32,2 [0,2]	32,2280	$1,7397 \times 10^{-2}$	2
64,4 [0,4]	64,4104	$6,4932 \times 10^{-3}$	3
96,6 [0,6]	96,5784	$-1,3362 \times 10^{-2}$	2
128,8 [0,8]	119,108	-6,0193	4
161,0 [1,0]	156,346	-2,8906	5

observado. A Figura 6.8 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dos casos com \bar{d} entre 0 e 0,6. É interessante destacar que nem sempre uma condição de falta trifásica não-sólida resulta em duas soluções para (5.10) dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Nos casos aqui estudados, a única condição de falta que resulta em uma solução única para (5.10) é aquela com $\bar{d} = 0,6$, cujas curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são apresentadas na Figura 6.8(d). Apesar disso, ambas as curvas continuam não apresentando uma variação quase linear ao longo de toda a LT, exibindo pontos de mínimo localizados na faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$.

Para solucionar o problema de convergência nas situações do caso (b) apresentadas nesta seção, pode-se aplicar previamente à utilização do método proposto a técnica de definição de i valores iniciais desenvolvida na Seção 5.6.3. A Tabela 6.10 mostra os resultados obtidos considerando a aplicação de tal técnica com $i = 3$. Note que utilizando esse procedimento, o algoritmo converge para a solução correta em todos os casos, o que comprova a eficácia da técnica implementada. É interessante notar que em todas as condições de falta apresentadas na Tabela 6.10, a estimativa inicial $d'(0)$ usada pelo algoritmo de localização de faltas desenvolvido apresenta um valor bastante próximo da distância d .

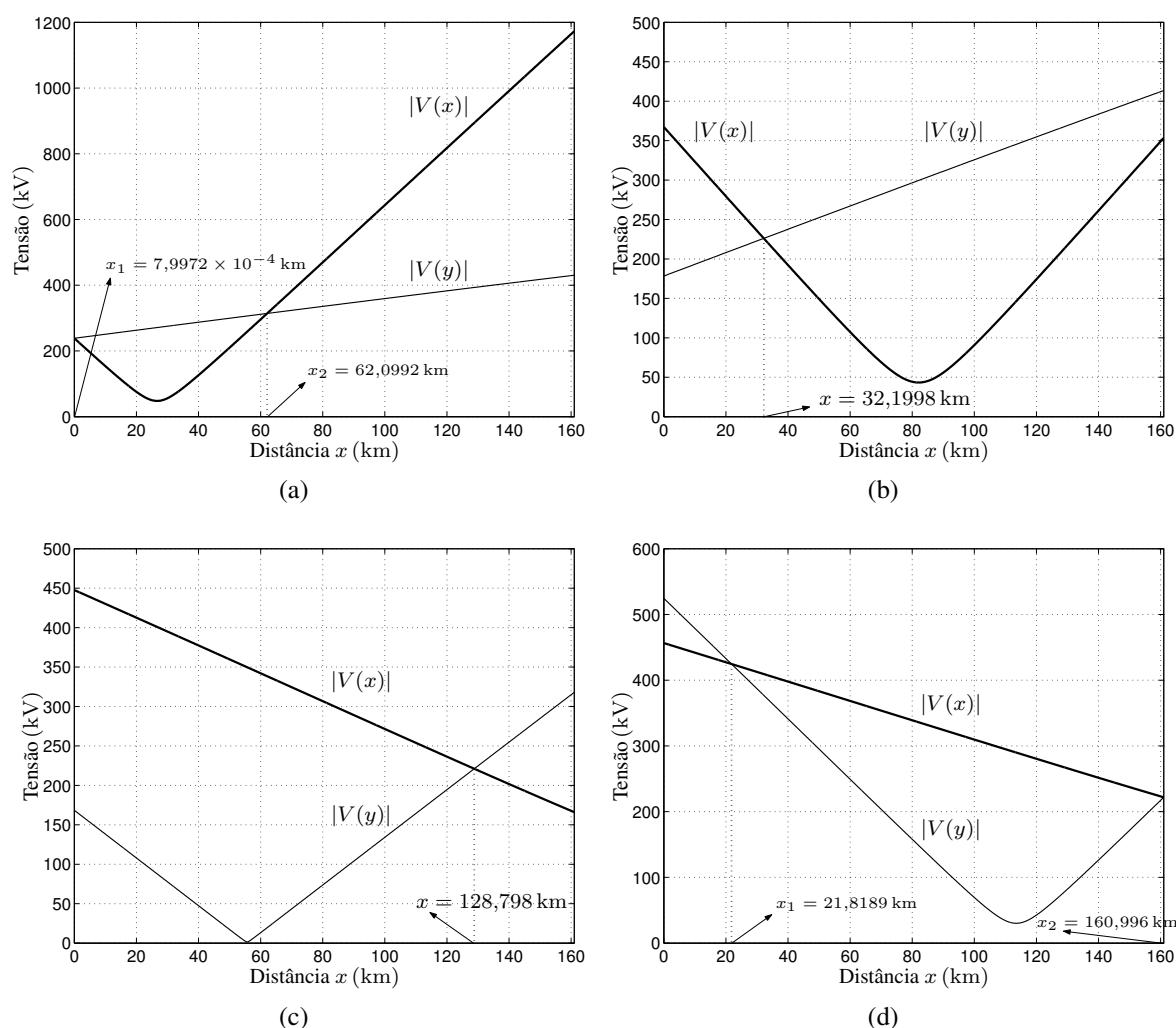


Figura 6.7: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 32,2$ km ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 128,8$ km ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 161$ km ($\bar{d} = 1,0$).

6.6 Testes Experimentais Considerando Outras Linhas de Transmissão

Até este ponto, foram apresentados os resultados de testes experimentais do método de localização de faltas proposto neste trabalho efetuados a partir de condições de falta no sistema de potência apresentado na Seção 5.3 simuladas com o auxílio do *software* ATP. Para comprovar que o método proposto não é eficiente apenas para a localização de faltas nesse sistema em particular, experimentos análogos aos apresentados anteriormente também são realizados com outros sistemas de potência do tipo mostrado na Figura 2.1, cujos resultados são similares aos obtidos até aqui. Para não tornar o texto excessivamente repetitivo, esta se-

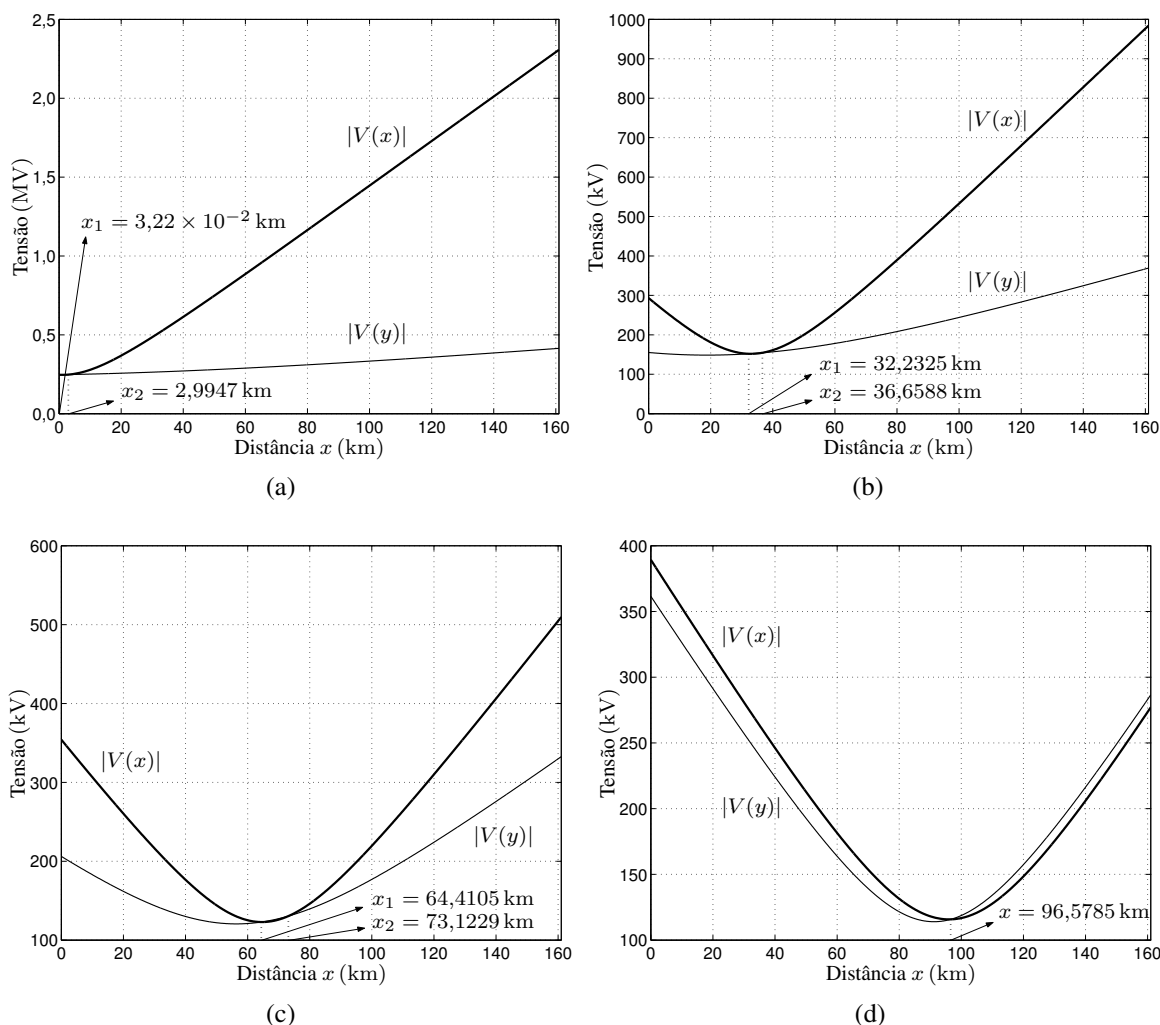


Figura 6.8: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 32,2$ km ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 64,4$ km ($\bar{d} = 0,4$). (d) Distância $d = 96,6$ km ($\bar{d} = 0,6$).

ção apresenta os resultados de testes experimentais realizados com apenas um desses demais sistemas de potência considerados neste trabalho de pesquisa, cujas características estão descritas na Tabela 6.11. Os parâmetros elétricos R_u , L_u e C_u da LT desse sistema de potência são típicos de LTs de 500 kV da Eletrosul (ver Tabelas 2.2 e 2.3). Sendo assim, essa LT é denominada LT Eletrosul deste ponto em diante. A fim de tornar as condições de falta aqui estudadas ligeiramente diferentes das consideradas até agora, a resistência de falta dos casos avaliados nesta seção é menor ($R_F = 1 \Omega$) e o comprimento da linha é maior ($\ell = 300$ km em vez de 161 km). Além disso, as impedâncias das fontes Z_S e Z_R , cujos valores são iguais aos adotados em [98], apresentam partes resistivas diferentes de zero. Nesta seção, vamos considerar a ocorrência de faltas dos quatro possíveis tipos localizadas ao longo da LT Eletrosul, variando o parâmetro \bar{d} em passos de 0,2 (que corresponde a 60 km para a LT Eletrosul),

Tabela 6.10: Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão, utilizando a técnica de definição de i valores iniciais ($i = 3$) apresentada na Seção 5.6.3

d (km) [\bar{d}]	$d'(0)$ (km)	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$5,8432 \times 10^{-2}$	$3,0510 \times 10^{-2}$	$1,8329 \times 10^{-2}$	1
32,2 [0,2]	28,4609	32,2316	$1,9632 \times 10^{-2}$	4
64,4 [0,4]	58,5209	64,4103	$6,4333 \times 10^{-3}$	4
96,6 [0,6]	96,5776	96,5784	$-1,3370 \times 10^{-2}$	2
128,8 [0,8]	130,219	128,747	$-3,2317 \times 10^{-2}$	3
161,0 [1,0]	159,258	160,931	$-4,2746 \times 10^{-2}$	4

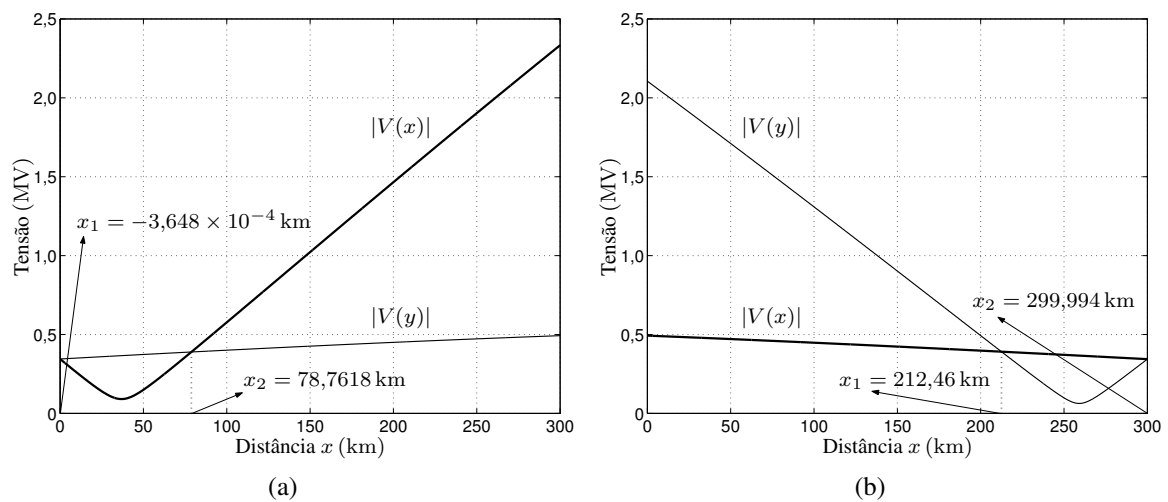


Figura 6.9: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 300$ km ($\bar{d} = 1,0$).

estudo semelhante ao apresentado na Seção 6.5 para o sistema de potência descrito na Seção 5.3.

Primeiramente, avalia-se o desempenho do método proposto na localização de faltas fase-terra ocorridas ao longo da LT Eletrosul. A Tabela 6.12 apresenta os resultados obtidos neste estudo. Pode-se notar que em todos os casos considerados o método proposto converge em duas iterações, fornecendo uma estimativa de localização de falta de erro desprezável. As únicas condições de falta cujas curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ merecem destaque são aquelas com \bar{d} igual a 0 e 1,0, que são mostradas na Figura 6.9. Esses dois casos apresentam duas soluções pertencentes ao caso (a). Da mesma maneira que nos casos desse tipo estudados anteriormente, o algoritmo desenvolvido converge para a solução correta em ambas as situações sem maiores problemas.

Tabela 6.11: Parâmetros do sistema de potência com linha de transmissão baseada em parâmetros típicos de linhas de 500 kV da Eletrosul

Parâmetro	Valor
Comprimento ℓ	300 km
Distância d	Variável
Distância \bar{d}	Variável
Tipo de falta	Variável
Resistência R_F	1 Ω
Tensão E_S	500e ^{j0} kV
Tensão E_R	500e ^{-j10°} kV
Impedância Z_S	0,238 + j5,7132 Ω
Impedância Z_R	0,238 + j6,190 Ω
Frequência f	60 Hz
Ângulo δ	45°
Resistência R_{u1}	0,0221 Ω /km
Indutância L_{u1}	0,852 mH/km
Capacitância C_{u1}	0,01346 μ F/km
Resistência R_{u0}	0,3777 Ω /km
Indutância L_{u0}	3,777 mH/km
Capacitância C_{u0}	0,00858 μ F/km

Considere agora o caso de faltas fase-fase localizadas ao longo da LT Eletrosul. A Tabela 6.13 apresenta os resultados obtidos neste estudo. Novamente, todas as faltas são localizadas em apenas duas iterações, resultando em estimativas de localização de falta com erros desprezáveis. Nessas simulações, quatro condições de falta resultam em duas soluções pertencentes à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$: aquelas com \bar{d} igual 0, 0,2, 0,8 e 1,0. A Figura 6.10 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dessas condições de falta, de onde se verifica que todas se enquadram no caso (a), uma vez que apenas uma das curvas de magnitude não apresenta um decaimento quase linear ao longo de toda a LT. Através das estimativas de localização de falta apresentadas na Tabela 6.13, pode-se constatar que o algoritmo desenvolvido converge corretamente para o valor numérico definido pelos pontos de interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dos casos mostrados na Figura 6.10.

O mesmo estudo anterior é realizado para faltas fase-fase-terra localizadas ao longo da LT Eletrosul, cujos resultados são mostrados na Tabela 6.14. Como nas demais situações consideradas nesta seção, todas as faltas fase-fase-terra são localizadas em duas iterações, resultando em erros de localização de falta de magnitudes desprezáveis. Como no caso de

Tabela 6.12: Resultados obtidos para condições de falta fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$-3,6500 \times 10^{-4}$	$-1,2166 \times 10^{-4}$	2
60 [0,2]	59,9916	$-2,7908 \times 10^{-3}$	2
120 [0,4]	119,992	$-2,5795 \times 10^{-3}$	2
180 [0,6]	179,989	$-3,5513 \times 10^{-3}$	2
240 [0,8]	239,985	$-4,9756 \times 10^{-3}$	2
300 [1,0]	299,994	$-1,8403 \times 10^{-3}$	2

Tabela 6.13: Resultados obtidos para condições de falta fase-fase localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$2,6250 \times 10^{-4}$	$8,7502 \times 10^{-5}$	2
60 [0,2]	59,9973	$-8,7510 \times 10^{-4}$	2
120 [0,4]	119,997	$-8,0965 \times 10^{-4}$	2
180 [0,6]	179,996	$-1,1314 \times 10^{-3}$	2
240 [0,8]	239,994	$-1,7205 \times 10^{-3}$	2
300 [1,0]	299,996	$-1,2384 \times 10^{-3}$	2

faltas fase-terra, apenas as condições de falta com \bar{d} igual 0 e 1,0 apresentam duas soluções, cujas curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ são mostradas na Figura 6.11. Como esperado devido ao tipo de falta, essas condições pertencem ao caso (a), pois apenas uma das curvas não apresenta um decaimento quase linear ao longo de toda a LT.

Por fim, estuda-se o caso de faltas trifásicas não-sólidas localizadas ao longo da LT Eletrosul que, como já mencionado, é o tipo de falta que oferece maior risco à convergência do método de localização de faltas proposto neste trabalho. Entretanto, diferentemente do estudo realizado na Seção 6.5, nenhuma condição de falta trifásica não-sólida aqui estudada resulta em mais de uma solução para (5.10) dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Logo, a utilização da técnica de definição de i valores iniciais desenvolvida na Seção 5.6.3 é desnecessária. A Tabela 6.15 apresenta os resultados obtidos neste estudo, na qual pode-se notar que, com exceção da condição de falta com $\bar{d} = 0,6$, a técnica desenvolvida requer mais iterações para convergir em relação aos demais casos estudados nesta seção. Além disso, verifica-se que os erros de localização de falta são maiores em relação aos obtidos nos demais experimentos deste trabalho, principalmente para as faltas localizadas nos pontos extremos da LT ($\bar{d} = 0$ e $\bar{d} = 1,0$). Tal fato, que pode ser atribuído a erros numéricos, pode ser melhor entendido através da Figura 6.12, que apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ para as

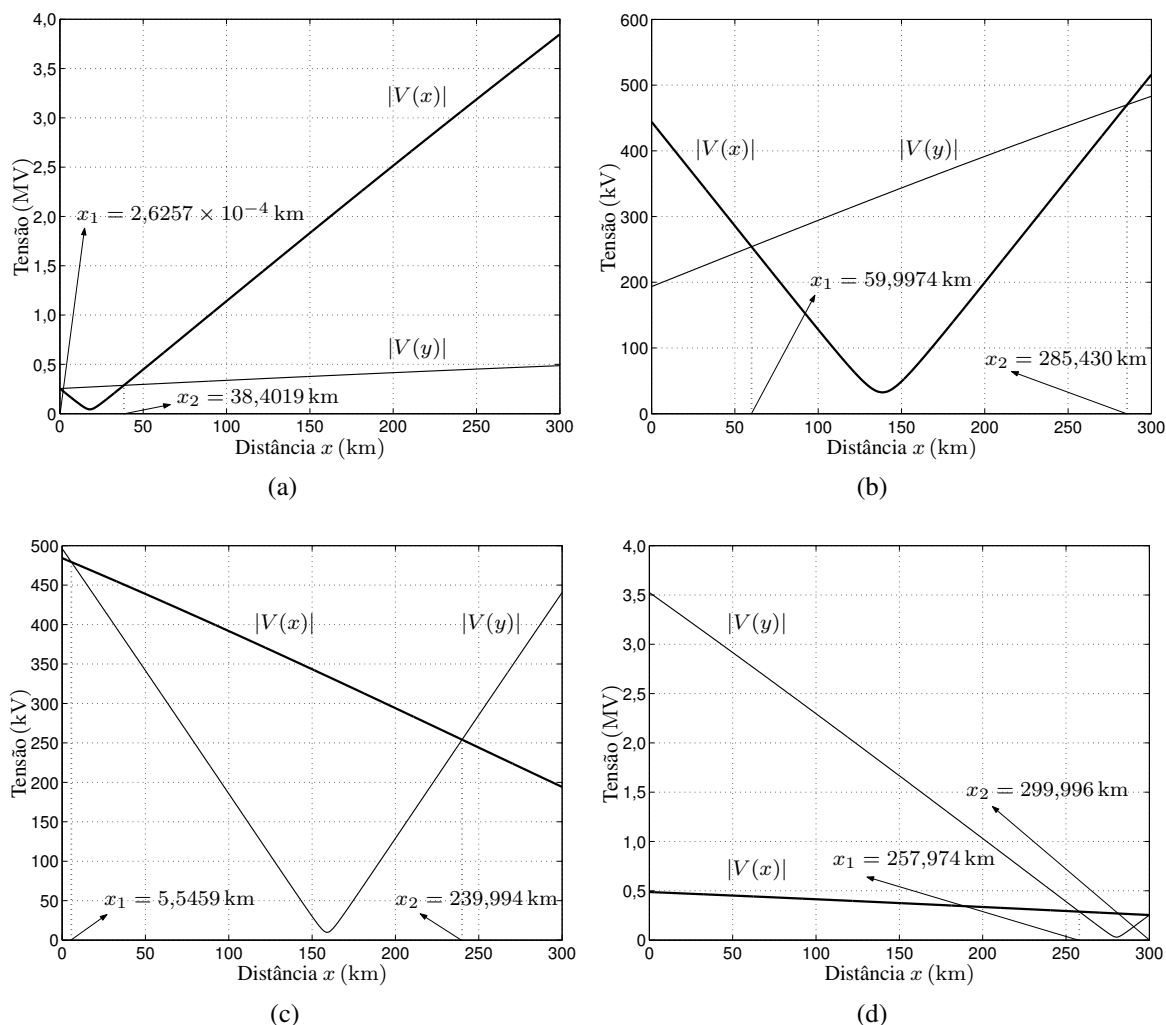


Figura 6.10: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 60$ km ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 240$ km ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 300$ km ($\bar{d} = 1,0$).

condições de falta com $\bar{d} = 0$ e $\bar{d} = 1,0$. Note que devido a erros numéricos, as curvas de magnitude sequer chegam a se cruzar. Como consequência, os erros de localização de falta são maiores do que os verificados nos casos estudados anteriormente. Apesar disso, o algoritmo proposto resulta em estimativas de localização de falta com erros aceitáveis na prática (magnitudes menores do que 0,2%).

Um ponto interessante é entender por que essas condições de falta trifásica não-sólidas consideradas nesta seção não apresentam mais de uma solução para (5.10) dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Tal fato ocorre porque está se adotando um valor de resistência de falta menor ($R_F = 1 \Omega$) do que o considerado na condição de falta padrão ($R_F = 10 \Omega$). Para provar tal afirmação, simulam-se novamente as condições de falta trifásica anteriores modificando-se apenas a resistência de falta para $R_F = 10 \Omega$. Com esse valor de resistência

Tabela 6.14: Resultados obtidos para condições de falta fase-fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$-1,2079 \times 10^{-3}$	$-4,0265 \times 10^{-4}$	2
60 [0,2]	59,9916	$-2,7908 \times 10^{-3}$	2
120 [0,4]	119,992	$-2,5795 \times 10^{-3}$	2
180 [0,6]	179,989	$-3,5513 \times 10^{-3}$	2
240 [0,8]	239,985	$-4,9756 \times 10^{-3}$	2
300 [1,0]	299,994	$-1,8403 \times 10^{-3}$	2

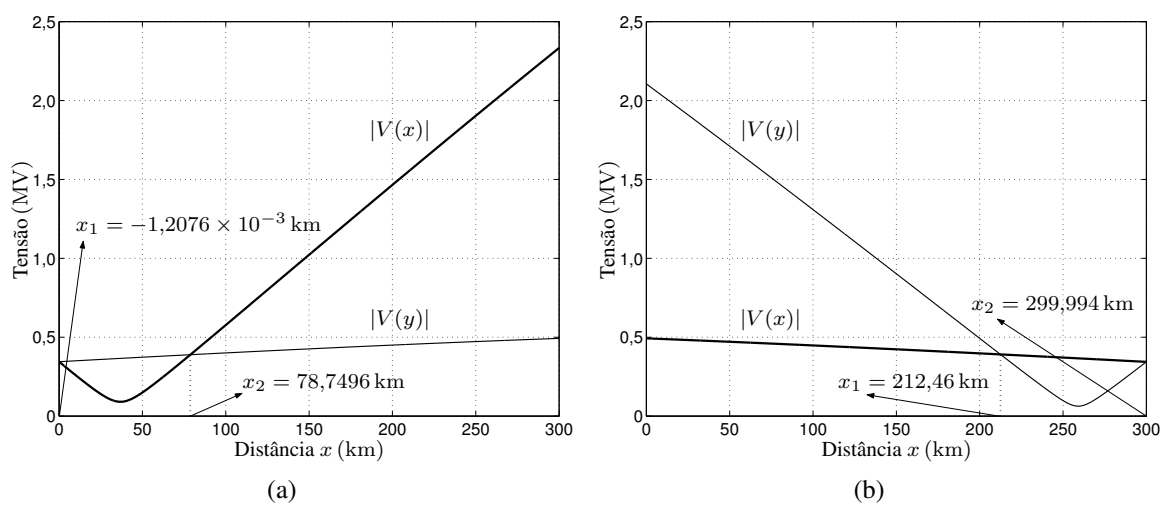


Figura 6.11: Magnitudes das funções $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta fase-fase-terra localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ km ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 300$ km ($\bar{d} = 1,0$).

de falta, quatro condições de falta passam a ter mais de uma solução para (5.10) dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$: aquelas com \bar{d} igual 0, 0,2, 0,8 e 1,0. A Figura 6.13 apresenta as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dessas condições de falta. Os resultados obtidos após a aplicação do método de localização de faltas desenvolvido são mostrados na Tabela 6.16. Note que agora as condições de falta com $\bar{d} = 0$ e $\bar{d} = 1,0$ resultam em erros de convergência. Além disso, é interessante verificar que esses são os únicos casos em que o método proposto necessita de mais de três iterações para convergir, o que comprova a informação anterior de que casos problemáticos (com erro de convergência) geralmente necessitam de mais de três iterações para convergir.

Novamente, a solução para o problema de convergência verificado anteriormente é aplicar a técnica de definição de i valores iniciais apresentada na Seção 5.6.3. Considerando $i = 3$, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6.17. Com esse procedimento, o método

Tabela 6.15: Resultados obtidos para condições de falta trifásica localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$3,13572 \times 10^{-1}$	$1,0452 \times 10^{-1}$	3
60 [0,2]	60,0865	$2,8835 \times 10^{-2}$	3
120 [0,4]	120,098	$3,2906 \times 10^{-2}$	3
180 [0,6]	179,944	$-1,8444 \times 10^{-2}$	2
240 [0,8]	239,976	$-7,7034 \times 10^{-3}$	3
300 [1,0]	299,498	$-1,6733 \times 10^{-1}$	4

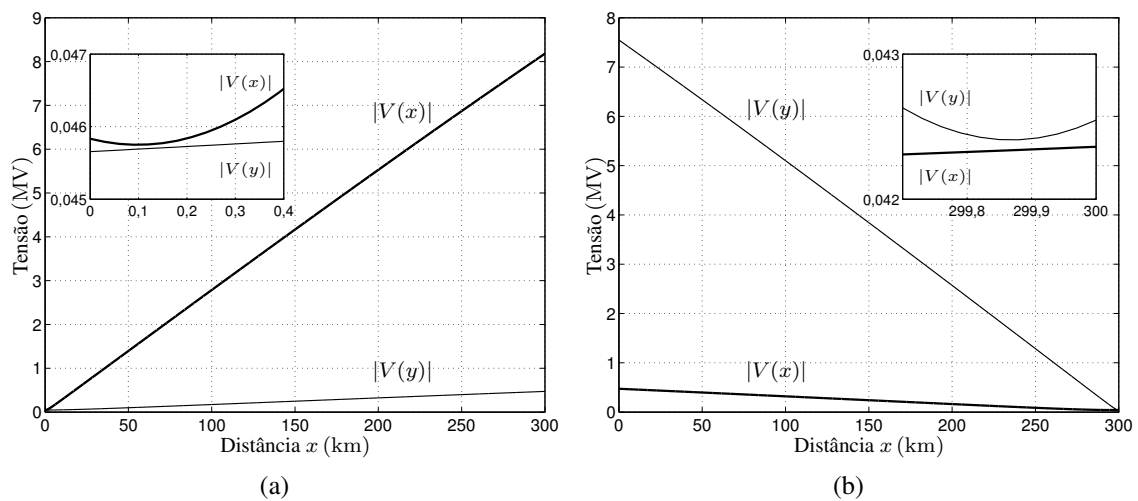


Figura 6.12: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta trifásica localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 300$ km ($\bar{d} = 1,0$).

proposto converge para a solução correta em todas as condições de falta consideradas neste estudo, comprovando assim a sua eficácia.

6.7 Sensibilidade do Método Proposto a Erro de Sincronismo

O objetivo desta seção é mostrar o efeito que uma falta de sincronismo entre os fasores dos dois terminais da LT causa no método proposto e no método de Johns/Jamali (descrito nas Seções 4.4.5 e 5.1). Para tal, utilizam-se novamente as condições de falta fase-terra, por ser o tipo de falta mais comum em sistemas de potência, com resistência de falta $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da LT descrita na Seção 5.3. Para simular uma falta de

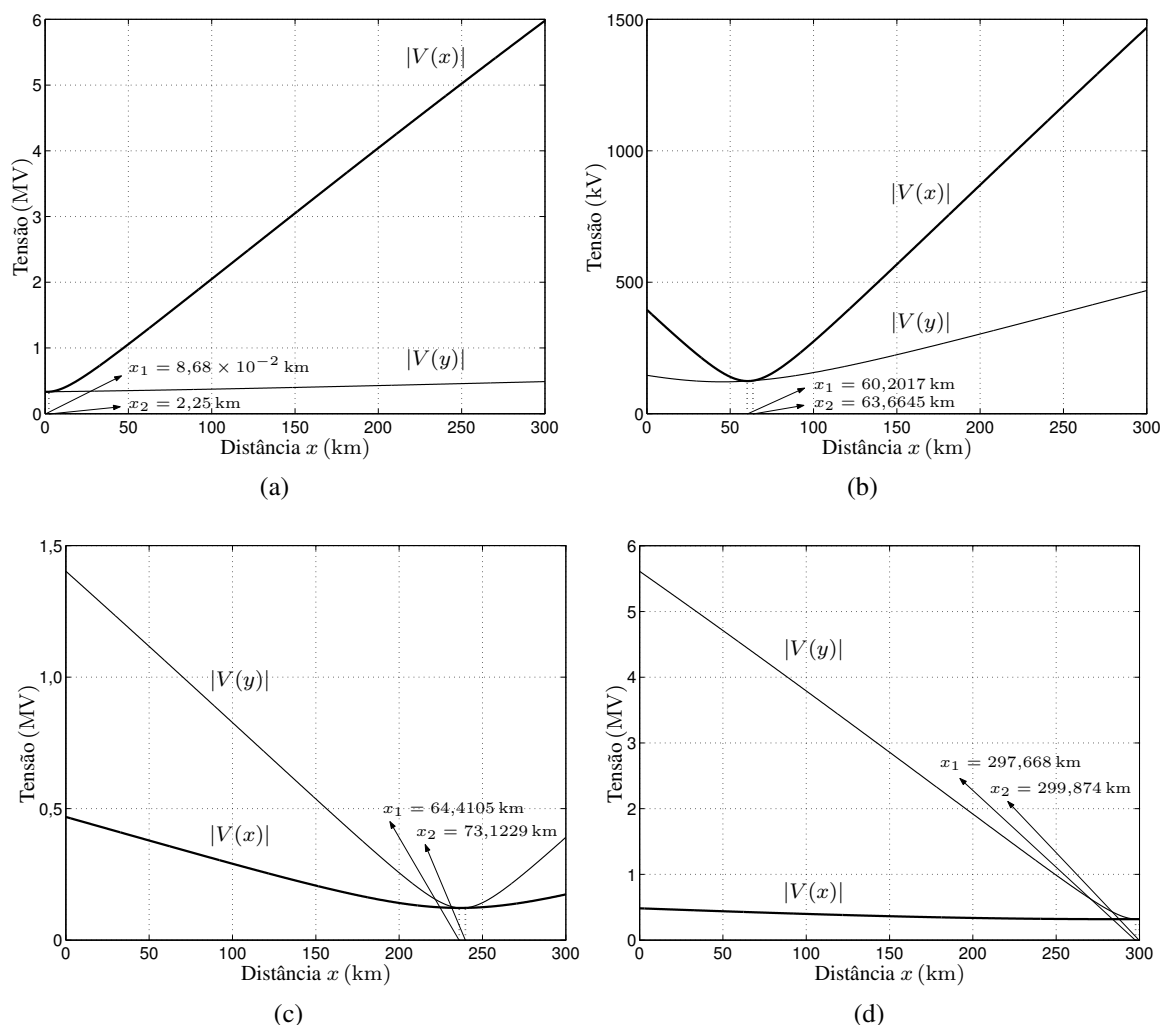


Figura 6.13: Magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul. (a) Distância $d = 0$ ($\bar{d} = 0$). (b) Distância $d = 60$ km ($\bar{d} = 0,2$). (c) Distância $d = 240$ km ($\bar{d} = 0,8$). (d) Distância $d = 300$ km ($\bar{d} = 1,0$).

sincronismo entre os fasores dos terminais da linha, adiciona-se aos fasores do terminal remoto um ângulo $\delta = \pm 10^\circ$, valor que também é comumente empregado na literatura [29], [53], [98].

Primeiramente, estuda-se o comportamento do método proposto nas situações consideradas. Como mostrado até aqui, o método proposto é insensível a erro de sincronismo entre fasores. Entretanto, é interessante realizar este estudo a fim de facilitar a sua comparação com o método de Johns/Jamali. A Tabela 6.18 apresenta as estimativas de localização de falta fornecidas pelo método proposto. Como era de se esperar, tais estimativas são exatamente iguais independentemente se o ângulo δ é nulo, positivo ou negativo. Além disso, essas estimativas de localização de falta são iguais àquelas obtidas considerando-se um ângulo δ bem maior ($\delta = 45^\circ$), que são mostradas na Tabela 6.2. Tal fato ocorre porque o

Tabela 6.16: Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul, sem a utilização da técnica de definição de i valores iniciais. As linhas em destaque representam os casos em que ocorre erro de convergência

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	2,27410	0,75803	5
60 [0,2]	60,1799	$5,9992 \times 10^{-2}$	3
120 [0,4]	120,084	$2,8260 \times 10^{-2}$	3
180 [0,6]	179,904	$-3,1928 \times 10^{-2}$	3
240 [0,8]	239,824	$-5,8641 \times 10^{-2}$	3
300 [1,0]	297,662	-0,77903	6

Tabela 6.17: Resultados obtidos para condições de falta trifásica com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão Eletrosul, utilizando a técnica de definição de i valores iniciais ($i = 3$)

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km)	ϵ (%)	n
0 [0,0]	$7,8288 \times 10^{-2}$	$2,6096 \times 10^{-2}$	1
60 [0,2]	60,1960	$6,5352 \times 10^{-2}$	4
120 [0,4]	120,080	$2,6796 \times 10^{-2}$	3
180 [0,6]	179,905	$-3,1440 \times 10^{-2}$	3
240 [0,8]	239,787	$-7,0896 \times 10^{-2}$	4
300 [1,0]	299,879	$-4,0221 \times 10^{-2}$	1

método desenvolvido se baseia apenas na interseção entre as magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$, resultando sempre na mesma estimativa de localização de falta independentemente do valor do ângulo δ .

Considere agora a aplicação do método de Johns/Jamali na localização dessas mesmas condições de falta fase-terra. Usando tal técnica, as estimativas de localização de falta obtidas são as apresentadas na Tabela 6.19. Analisamos inicialmente as estimativas correspondentes às condições de falta para as quais o ângulo δ é nulo (segunda coluna da Tabela 6.19). Nesses casos, as estimativas de localização de falta apresentam uma parte imaginária de magnitude desprezável, que idealmente deveria ser nula. A existência dessa pequena parte imaginária pode ser atribuída aos fatores (i) e (ii) apresentados na Seção 5.5, que, como já mostrado, também colaboram para a existência de um pequeno erro de localização de falta que o método proposto apresenta nos testes experimentais realizados até aqui. A Figura 6.14, que se refere à condição de falta com $d = 64,4$ km, ajuda a entender a origem da parte imaginária das estimativas de localização de falta apresentadas na Tabela 6.19 para $\delta = 0$. O

Tabela 6.18: Estimativas de localização de falta fornecidas pelo método proposto, considerando faltas fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão e considerando diferentes valores de erro de sincronismo δ

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km) para $\delta = 0$	\hat{d} (km) para $\delta = +10^\circ$	\hat{d} (km) para $\delta = -10^\circ$
0 [0,0]	$7,8466 \times 10^{-4}$	$7,8466 \times 10^{-4}$	$7,8466 \times 10^{-4}$
32,2 [0,2]	32,1994	32,1994	32,1994
64,4 [0,4]	64,3990	64,3990	64,3990
96,6 [0,6]	96,5977	96,5977	96,5977
128,8 [0,8]	128,795	128,795	128,795
161,0 [1,0]	160,992	160,992	160,992

Tabela 6.19: Estimativas de localização de falta fornecidas pelo método de Johns/Jamali, considerando faltas fase-terra com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da linha de transmissão e considerando diferentes valores de erro de sincronismo δ

d (km) [\bar{d}]	\hat{d} (km) para $\delta = 0$	\hat{d} (km) para $\delta = +10^\circ$	\hat{d} (km) para $\delta = -10^\circ$
0 [0,0]	$(-6,89 - j10,9) \times 10^{-4}$	$16,155 + j9,8875$	$-14,157 - j11,953$
32,2 [0,2]	$32,198 - j0,0015$	$52,314 + j30,602$	$16,465 - j30,892$
64,4 [0,4]	$64,398 - j0,0003$	$85,851 + j42,494$	$47,249 - j40,812$
96,6 [0,6]	$96,598 + j0,0018$	$117,11 + j44,743$	$78,736 - j41,997$
128,8 [0,8]	$128,79 + j0,0042$	$146,69 + j37,111$	$111,41 - j34,509$
161,0 [1,0]	$160,99 + j0,0058$	$175,43 + j19,969$	$145,85 - j18,233$

método de Johns/Jamali é baseado na igualdade (5.5), aqui repetida:

$$V(x) \Big|_{x=d} = V(y) \Big|_{y=\ell-d}. \quad (6.5)$$

Portanto, tanto a magnitude quanto a fase das funções $V(x)$ e $V(y)$ devem ser iguais no ponto $x = d$. Entretanto, erros numéricos fazem com que as interseções entre as curvas de magnitude [Figura 6.14(a)] e de fase [Figura 6.14(b)] definam estimativas de localização de falta levemente diferentes: 64,3990 km e 64,3981 km, respectivamente. Sendo assim, a estimativa de localização de falta fornecida pelo método de Johns/Jamali deixa de ser puramente real, apresentando uma pequena parte imaginária que pode ser desprezada sem maiores problemas.

Considere agora o método de Johns/Jamali aplicado na localização das condições de falta com $\delta = \pm 10^\circ$. Como mostrado em [53], o método em questão necessita de uma etapa de sincronização dos fasores dos terminais local e remoto, que é baseada nos fasores de

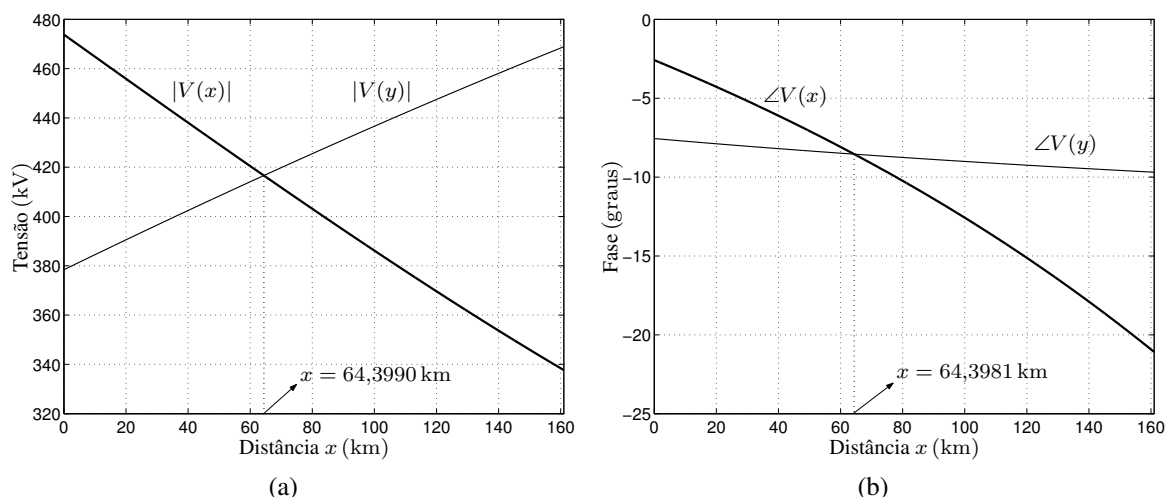


Figura 6.14: Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$, $d = 64,4$ km e ângulo $\delta = 0$. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.

tensão e corrente de pré-falta medidos em ambos os terminais da LT. Nos testes aqui apresentados, tal rotina é desconsiderada, pois se deseja avaliar o efeito que um erro de sincronismo causa no método de Johns/Jamali. Pode-se notar através da Tabela 6.19 que as partes imaginárias das estimativas de localização de falta das condições com $\delta = \pm 10^\circ$ tornam-se comparáveis às suas partes reais. Para facilitar a compreensão desse efeito, considere a Figura 6.15, que apresenta as curvas de fase de $V(x)$ e $V(y)$ para a condição de falta com $d = 64,4$ km e $\delta = \pm 10^\circ$ [as curvas de magnitude de ambos os casos são as mesmas apresentadas na Figura 6.14(a)]. Nesse caso, as interseções entre as magnitudes de $V(x)$ e $V(y)$ [$x = 64,3990$ km, ver Figura 6.14(a)] e entre as fases de $V(x)$ e $V(y)$ ocorrem em valores de x muito diferentes: para $\delta = -10^\circ$ ocorre em $x = 151,414$ km; para $\delta = +10^\circ$, as curvas de fase de $V(x)$ e $V(y)$ nem se chegam a se cruzar dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Sendo assim, é impossível definir um valor real para a distância d que satisfaça a condição (6.5) tanto em termos de magnitude quanto de fase. Daí a obtenção de uma estimativa \hat{d} cuja parte imaginária apresenta um valor considerável.

Outro parâmetro que permite comparar o método de Johns/Jamali e o proposto neste trabalho em função da existência ou não de um erro de sincronismo entre medidas é o erro de localização de falta das estimativas apresentadas nas Tabelas 6.18 e 6.19. Tais erros são mostrados na Tabela 6.20. Como considerado até então, o erro de localização de falta das estimativas obtidas através da aplicação do método proposto é calculado através de (2.7). No caso do método de Johns/Jamali, que apresenta uma estimativa \hat{d} com parte imaginária diferente de zero, o erro de localização de falta é calculado considerando apenas a parte real

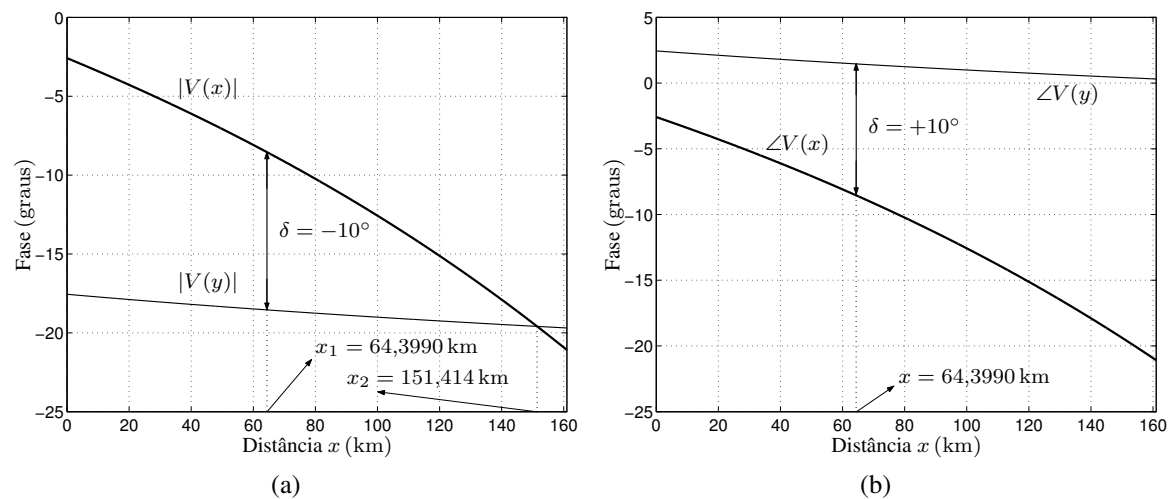


Figura 6.15: Fases de $V(x)$ e $V(y)$ para a condição de falta fase-terra com $R_F = 10 \Omega$, $d = 64,4$ km e $\delta \neq 0$. (a) Ângulo $\delta = -10^\circ$. (b) Ângulo $\delta = +10^\circ$.

Tabela 6.20: Comparação entre o método de Johns/Jamali (I) e o método proposto (II) através dos erros de localização de falta das estimativas mostradas nas Tabelas 6.18 e 6.19

d (km) [\bar{d}]	ϵ (%) de I $\delta = 0$	ϵ (%) de I $\delta = +10^\circ$	ϵ (%) de I $\delta = -10^\circ$	ϵ (%) de II qualquer δ
0 [0,0]	$-3,0462 \times 10^{-4}$	10,034	-8,7932	$4,8736 \times 10^{-4}$
32,2 [0,2]	$-8,7288 \times 10^{-4}$	12,493	-9,7730	$-3,1727 \times 10^{-4}$
64,4 [0,4]	$-7,1533 \times 10^{-4}$	13,323	-10,652	$-6,1633 \times 10^{-4}$
96,6 [0,6]	$-8,9485 \times 10^{-4}$	12,741	-11,095	$-1,4129 \times 10^{-3}$
128,8 [0,8]	$-1,5238 \times 10^{-3}$	11,116	-10,797	$-2,8262 \times 10^{-3}$
161,0 [1,0]	$-1,9504 \times 10^{-3}$	8,9657	-9,4068	$-4,7531 \times 10^{-3}$

dessa estimativa [53]. Sendo assim, define-se

$$\epsilon = \frac{\text{Re}(\hat{d}) - d}{\ell} \times 100. \quad (6.6)$$

Pode-se concluir através dos dados da Tabela 6.20 que em situações ideais, em que tanto os fasores quanto os parâmetros da LT são isentos de erros, as duas técnicas consideradas apresentam erros de localização de falta cujas magnitudes são desprezáveis, caso os fasores dos dois terminais sejam sincronizados ($\delta = 0$). Para medidas não-sincronizadas, o erro de localização de falta do método de Johns/Jamali torna-se bastante elevado, com magnitude na faixa de 9 a 11 % para os casos aqui estudados. Já o método proposto resulta no mesmo erro de localização de falta qualquer que seja o valor do ângulo δ .

6.8 Sensibilidade do Método Proposto a Erros nos Fasores e nos Parâmetros da Linha de Transmissão

Esta seção apresenta um estudo acerca da principal FE a que o método de localização de faltas proposto está sujeito: erros nos fasores de frequência fundamental (magnitude e fase) e erros nos parâmetros da LT. Utilizam-se nos testes desta seção fasores dos dois terminais sincronizados ($\delta = 0$) a fim de permitir a comparação entre os desempenhos do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II) nas condições consideradas. Para tal, vamos utilizar novamente condições de falta fase-terra, por ser o tipo mais comum em sistemas de potência, com $R_F = 10 \Omega$ localizadas ao longo da LT descrita na Seção 5.3.

Os erros de magnitude e fase dos fasores do terminais S e R podem ser atribuídos aos seguintes fatores:

- erros na etapa de definição dos fasores de frequência fundamental, inclusive na filtragem de sinais transitórios medidos nos terminais S e R;
- erros devido ao fato de que nem sempre os sinais de pós-falta medidos em ambos os terminais da LT alcançam a condição de regime permanente necessária para a definição correta de um fasor de frequência fundamental devido à atuação rápida da proteção;
- erros causados pela precisão dos instrumentos de medidas, TPs e TCs.

No caso dos parâmetros da LT, os erros podem ser causados pelos seguintes fatores:

- os parâmetros reais da LT não são iguais aos de projeto; sempre há desvios nos valores desses parâmetros em relação aos seus valores nominais;
- determinadas condições, como a temperatura, por exemplo, causam variações nos parâmetros de uma LT. Por exemplo, a temperatura no início de uma LT, especialmente em uma linha longa, pode ser significativamente diferente da verificada no seu trecho final. Assim, o início da LT apresenta um valor de resistência unitária maior ou menor do que no seu final. Nesse caso, considerar a LT homogênea implica em erro de localização de falta.

Para avaliar o efeito que os erros nos fasores e nos parâmetros da LT exercem sobre o desempenho do método proposto, utiliza-se a mesma estratégia adotada em [53], que consiste em estipular variações percentuais nas magnitudes dos fasores (das três fases) de ambos os terminais bem como na matriz impedância da LT e variações de $\pm 10^\circ$ nas fases dos fasores (das três fases) de ambos os terminais da linha.

Tabela 6.21: Diferentes condições de erros de magnitude nos fasores de tensão e corrente

Caso	$[V_{SA}, V_{SB}, V_{SC}]$	$[I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}]$	$[V_{RA}, V_{RB}, V_{RC}]$	$[I_{RA}, I_{RB}, I_{RC}]$
1	+2 %	+2 %	-2 %	-2 %
2	-2 %	-2 %	+2 %	+2 %
3	+2 %	-2 %	+2 %	-2 %
4	-2 %	+2 %	-2 %	+2 %
5	+2 %	+2 %	+2 %	+2 %
6	-2 %	-2 %	-2 %	-2 %

Tabela 6.22: Resultados obtidos para o Caso 1 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	1,5309	4,6735
0,2	4,3125	5,8440
0,4	5,8492	7,1779
0,6	6,1074	7,3792
0,8	5,0676	6,3620
1,0	2,7214	4,3840

6.8.1 Sensibilidade do Método Proposto a Erros nas Magnitudes dos Fasores

Para avaliar a influência de erros nas magnitudes dos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da LT no desempenho do método proposto, utiliza-se a estratégia de variar tais parâmetros em $\pm 2\%$ (das três fases), como mostra a Tabela 6.21.

Primeiramente, vamos considerar os Casos 1 e 2, que representam as piores situações possíveis, pois os fasores de tensão e corrente de um terminal são elevados ao passo que os fasores de tensão e corrente do outro terminal são diminuídos. As Tabelas 6.22 e 6.23 apresentam os resultados obtidos para os Casos 1 e 2, respectivamente. Pode-se notar que realmente esse tipo de situação é bastante prejudicial tanto para o método de Johns/Jamali quanto para o método proposto, apesar de que o primeiro apresenta um desempenho levemente superior nas situações consideradas.

Considere agora os Casos 3 e 4. Note que em ambos os terminais, um dos fasores diminui e outro aumenta. Logo, a variação não é completamente negativa em um terminal e completamente positiva no outro, causando assim menos problemas ao desempenho dos métodos de localização considerados. As Tabelas 6.24 e 6.25 apresentam os resultados obtidos para os Casos 3 e 4, respectivamente. Pode-se notar que realmente os erros de localização

Tabela 6.23: Resultados obtidos para o Caso 2 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	-1,5974	-4,4606
0,2	-4,4568	-5,8574
0,4	-5,9897	-7,1593
0,6	-6,1946	-7,3078
0,8	-5,0873	-6,2580
1,0	-2,7024	-4,3076

Tabela 6.24: Resultados obtidos para o Caso 3 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	-0,2008	-0,4157
0,2	0,1742	-0,1470
0,4	0,4478	0,0777
0,6	0,6644	0,2723
0,8	0,8709	0,4764
1,0	1,1163	0,7034

de falta de ambas as técnicas apresentam magnitudes bem menores do que as verificadas nos Casos 1 e 2. Além disso, nos Casos 3 e 4 o desempenho do método proposto é levemente superior ao do método de Johns/Jamali.

Um ponto interessante a se observar é o efeito que os erros nas magnitudes dos fasores exercem sobre as curvas de magnitude e fase de $V(x)$ e $V(y)$. A Figura 6.16 mostra essas curvas para o Caso 3 e distância $\bar{d} = 0,8$. Pode-se notar que o efeito causado por erros de magnitude é semelhante ao causado por um erro de sincronismo: alterar os pontos de interseção entre as curvas de magnitude e as curvas de fase de $V(x)$ e $V(y)$. Tal conclusão também é válida para erros nas fases dos fasores e nos parâmetros da LT. Para não tornar o texto repetitivo, as curvas dos demais casos não são mostradas.

Por fim, vamos considerar os Casos 5 e 6. Note que nesse tipo de situação os fasores de ambos os terminais são elevados ou diminuídos na mesma proporção. Sendo assim, tais variações não exercem influência alguma sobre o erro de localização de falta dos métodos considerados. Em todos os casos, as magnitudes desses erros de localização apresentam ordem de grandeza de 10^{-3} ou 10^{-4} , tornando desnecessário apresentar tais dados na forma de tabelas.

Tabela 6.25: Resultados obtidos para o Caso 4 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	0,1919	0,4045
0,2	-0,1712	0,1436
0,4	-0,4361	-0,0729
0,6	-0,6460	-0,2609
0,8	-0,8456	-0,4586
1,0	-1,0805	-0,6772

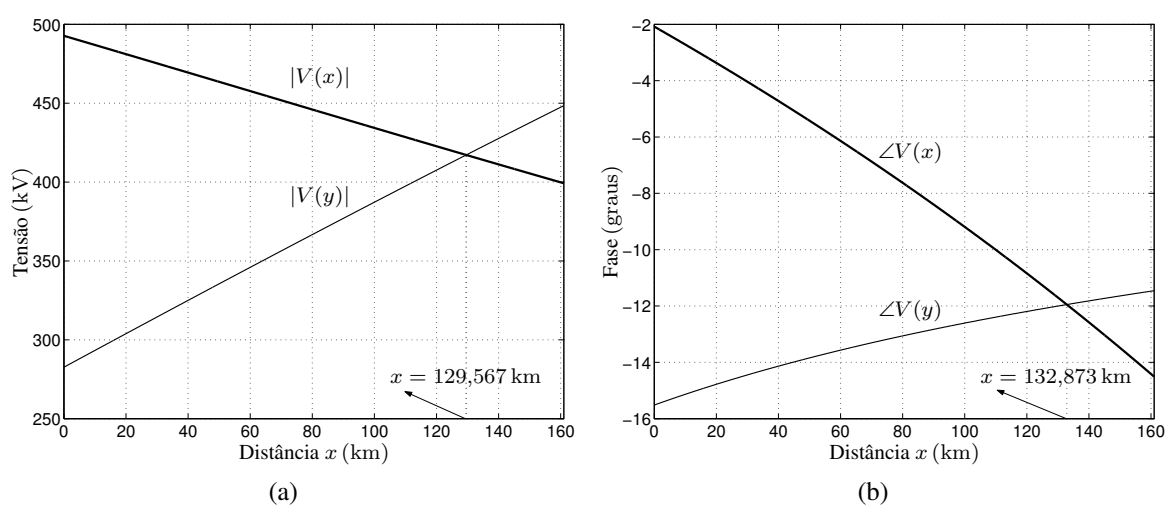


Figura 6.16: Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ para o Caso 3 e distância $\bar{d} = 0,8$ ($d = 128,8$ km). (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.

6.8.2 Sensibilidade a Erros nas Fases dos Fasores

Para avaliar a influência de erros nas fases dos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da LT no desempenho do método proposto, utiliza-se a estratégia de variar tais parâmetros em $\pm 10^\circ$ (das três fases), como mostra a Tabela 6.26.

Considere inicialmente apenas os Casos 7 e 8. Note que nessas situações os fasores de tensão e corrente de cada terminal sofrem a mesma variação de $\pm 10^\circ$. Logo, a fase relativa entre os fasores de tensão e corrente de um mesmo terminal não é alterada. Assim, esse tipo de situação é equivalente a adicionarmos um erro de sincronismo $\delta = \pm 20^\circ$ entre os fasores dos terminais S e R. Como mostra a Seção 6.7, o método proposto é imune a tal efeito ao passo que o método de Johns/Jamali é fortemente influenciado por essa FE. As Tabelas 6.27 e 6.28 corroboram tal afirmação. Note que realmente os erros de localização de falta do método proposto apresentam magnitude desprezável, e são iguais aos obtidos na Seção 6.2

Tabela 6.26: Diferentes condições de erros de fase nos fasores de tensão e corrente

Caso	$[V_{SA}, V_{SB}, V_{SC}]$	$[I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}]$	$[V_{RA}, V_{RB}, V_{RC}]$	$[I_{RA}, I_{RB}, I_{RC}]$
7	+10°	+10°	-10°	-10°
8	-10°	-10°	+10°	+10°
9	+10°	-10°	+10°	-10°
10	-10°	+10°	-10°	+10°

Tabela 6.27: Resultados obtidos para o Caso 7 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	21,181	$4,8736 \times 10^{-4}$
0,2	28,213	$-3,1727 \times 10^{-4}$
0,4	30,263	$-6,1633 \times 10^{-4}$
0,6	27,930	$-1,4129 \times 10^{-3}$
0,8	22,875	$-2,8262 \times 10^{-3}$
1,0	17,513	$-4,7531 \times 10^{-3}$

(ver Tabela 6.2). Já os erros apresentados pelo método de Johns/Jamali são bastante elevados, atingindo mais de 20 % em alguns casos estudados.

Considere agora os Casos 9 e 10. Note que nessas situações as fases relativas entre os fasores de tensão e corrente de um mesmo terminal são alteradas. Logo, nesse caso não se tem apenas um erro de sincronismo adicionado ao processo de localização de falta. Sendo assim, o método proposto passa a ser influenciado por esse tipo de erro. As Tabelas 6.29 e 6.30 apresentam os resultados dos Casos 9 e 10, respectivamente. No Caso 9, o desempenho do método de Johns/Jamali é levemente superior ao do método proposto. Já no caso 10, o desempenho do método de Johns/Jamali é bastante superior ao do método proposto.

Tabela 6.28: Resultados obtidos para o Caso 8 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	-16,259	$4,8736 \times 10^{-4}$
0,2	-17,221	$-3,1727 \times 10^{-4}$
0,4	-19,274	$-6,1633 \times 10^{-4}$
0,6	-21,083	$-1,4129 \times 10^{-3}$
0,8	-21,531	$-2,8262 \times 10^{-3}$
1,0	-19,294	$-4,7531 \times 10^{-3}$

Tabela 6.29: Resultados obtidos para o Caso 9 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	-1,0316	0,2268
0,2	-4,9087	-5,0166
0,4	-7,3650	-7,5060
0,6	-8,3636	-8,5110
0,8	-7,8945	-8,3493
1,0	-6,0041	-8,4873

Tabela 6.30: Resultados obtidos para o Caso 10 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	1,6270	-3,3120
0,2	4,5407	7,4889
0,4	6,3642	11,6033
0,6	6,8221	13,8035
0,8	5,7326	14,9752
1,0	2,9897	18,6132

6.8.3 Sensibilidade a Erros nos Parâmetros da Linha de Transmissão

Para avaliar a influência de erros dos parâmetros da LT no desempenho do método proposto, utiliza-se a estratégia de alterar a matriz impedância \mathbf{Z} da linha em $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, como mostra a Tabela 6.31.

As Tabelas 6.32 a 6.35 apresentam os resultados dos Casos 11 a 14, respectivamente. Pode-se concluir que na maior parte das situações consideradas o desempenho do método proposto é superior ao do método de Johns/Jamali. Observando as magnitudes dos erros de localização de falta desses casos, percebe-se que erros nos parâmetros da LT indi-

Tabela 6.31: Diferentes condições de erros na impedância série da linha de transmissão

Caso	Matriz \mathbf{Z}
11	+10 %
12	+5 %
13	-5 %
14	-10 %

Tabela 6.32: Resultados obtidos para o Caso 11 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	0,5176	1,1741
0,2	-0,2669	0,5171
0,4	-0,9504	-0,0893
0,6	-1,5581	-0,6703
0,8	-2,1168	-1,2446
1,0	-2,6548	-1,7751

Tabela 6.33: Resultados obtidos para o Caso 12 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	0,6121	0,2709
0,2	0,2687	-0,1400
0,4	-0,0498	-0,4980
0,6	-0,3558	-0,8165
0,8	-0,6588	-1,1096
1,0	-0,9402	-1,3917

cam uma menor influência sobre o desempenho do método proposto em relação aos erros nos fasores, ainda que a variação considerada para os parâmetros da LT ($\pm 5\%$ e $\pm 10\%$) seja bem maior do que a utilizada para os fasores ($\pm 2\%$).

6.9 Testes Experimentais a Partir de Dados de Falhas Reais

Os testes experimentais considerados até este ponto são realizados a partir de variadas condições de falta simuladas com o auxílio do ATP. Esta seção apresenta os resultados de testes experimentais realizados a partir de dados provenientes de quatro condições de falta ocorridas em duas LTs reais transpostas e homogêneas. A frequência de amostragem dos sinais de tensão e corrente é $f_a = 1920$ Hz (32 amostras/ciclo), sendo que essas medidas são sincronizadas ($\delta = 0$). Tal fato não atrapalha a avaliação do método desenvolvido pois, como mostra a Seção 6.7, o fato de o ângulo δ ser ou não nulo não interfere no seu desempenho. Deve-se destacar a dificuldade que tivemos em obter dados de falhas reais. Primeiramente porque nem todas as concessionárias de energia que possuem localizadores de falta em suas LTs arquivam as informações relativas às localizações estimada e real de uma falta. Outro ponto é que quando tais dados existem, eles geralmente são considerados sigilosos.

Tabela 6.34: Resultados obtidos para o Caso 13 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	-0,6690	-0,3007
0,2	-0,2936	0,1525
0,4	0,0595	0,5485
0,6	0,3991	0,9005
0,8	0,7342	1,2234
1,0	1,0465	1,5343

Tabela 6.35: Resultados obtidos para o Caso 14 a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II)

Distância \bar{d}	Erro ϵ do Método I (%)	Erro ϵ do Método II (%)
0,0	-1,4063	-0,6344
0,2	-0,6152	0,3224
0,4	0,1323	1,1584
0,6	0,8530	1,9020
0,8	1,5654	2,5848
1,0	2,2321	3,2416

Como os dados são reais, neste estudo existem erros nos fasores de frequência fundamental e nos parâmetros da LT. Outro ponto importante é que se desconhecem mais informações a respeito da etapa de medição dos dados de faltas reais utilizados nesta seção, bem como acerca da etapa de extração dos fasores de frequência fundamental. Por exemplo, a classe de exatidão dos TPs e TCs utilizados nas medições dos sinais de tensão e corrente dos dois terminais da LT é desconhecida. Outro ponto que pode prejudicar a avaliação do desempenho do método proposto é que a distância real das faltas aqui consideradas é medida com precisão de 1 km, como mostram as Tabelas 6.36, 6.38, 6.40 e 6.42. Uma precisão com essa magnitude representa, por exemplo, para a menor LT considerada nesta seção ($\ell = 173,2$ km), Caso Real 4) que a medida real pode ter um erro máximo de quase 0,6 % do comprimento ℓ da LT. Como o erro de localização de falta definido por (2.7) representa um percentual do comprimento da LT, esse erro de precisão da medida real é naturalmente adicionado ao erro de localização de falta ϵ do método proposto.

Para fins de comparação, as quatro condições de falta reais apresentadas a seguir são localizadas tanto pelo método de Johns/Jamali (Método I) quanto pelo método proposto neste trabalho (Método II). Tal comparação é válida uma vez que o desempenho dessas duas técnicas para o caso de fasores dos dois terminais sincronizados deve ser equivalente, como

Tabela 6.36: Parâmetros do Caso Real 1

Parâmetro	Valor
Comprimento ℓ	342,71 km
Nível de tensão	500 kV
Distância d	76 km
Distância \bar{d}	0,22
Tipo de falta	Fase-terra
Causa	Queimada

mostra a Seção 6.7. Como o método de Johns/Jamali é considerado um dos melhores apresentados na literatura, usado inclusive em localizadores de falta comerciais, comparar o seu desempenho com o verificado com o método proposto permite validar a abordagem apresentada neste trabalho, mesmo que o erro de localização de falta seja relativamente elevado em determinadas condições de falta devido a erros nos fasores e nos parâmetros na LT. Vale lembrar que o erro do método de Johns/Jamali é definido a partir de (6.6), uma vez que as estimativas de localização de falta fornecidas por esse algoritmo sempre apresentam partes imaginárias não-nulas em função de erros nos fasores e nos parâmetros da LT.

6.9.1 Caso Real 1

A primeira condição de falta real estudada neste trabalho (Caso Real 1) ocorre em uma LT de 500 kV com 342,71 km de extensão. Na realidade, os Casos Reais 2 e 3 também ocorrem nessa LT, como mostrado na seqüência. Os demais parâmetros do Caso Real 1 são descritos na Tabela 6.36.

A Figura 6.17 apresenta as curvas de magnitude e fase de $V(x)$ e $V(y)$ dessa condição de falta real. Através dessa figura é possível perceber a existência de erros nos fasores e nos parâmetros da LT, uma vez que os pontos de interseção entre as curvas de magnitude [ver Figura 6.17(a)] e fase [ver Figura 6.17(b)] de $V(x)$ e $V(y)$ são diferentes. Note que na verdade as curvas de fase de $V(x)$ e $V(y)$ nem chegam a se interceptar dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$.

A Tabela 6.37 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II) na localização dessa condição de falta real. Pode-se notar que nessa situação o método de Johns/Jamali apresenta um desempenho superior ao do método proposto. Apesar disso, é interessante verificar que a técnica aqui desenvolvida converge corretamente para a interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ apresentadas na Figura 6.17(a). Logo, o erro de localização de falta do método proposto não ocorre devido à técnica em si, mas sim devido aos erros nos fasores e nos parâmetros da LT. No caso do método de Johns/Jamali, o erro de localização de falta também pode ser influen-

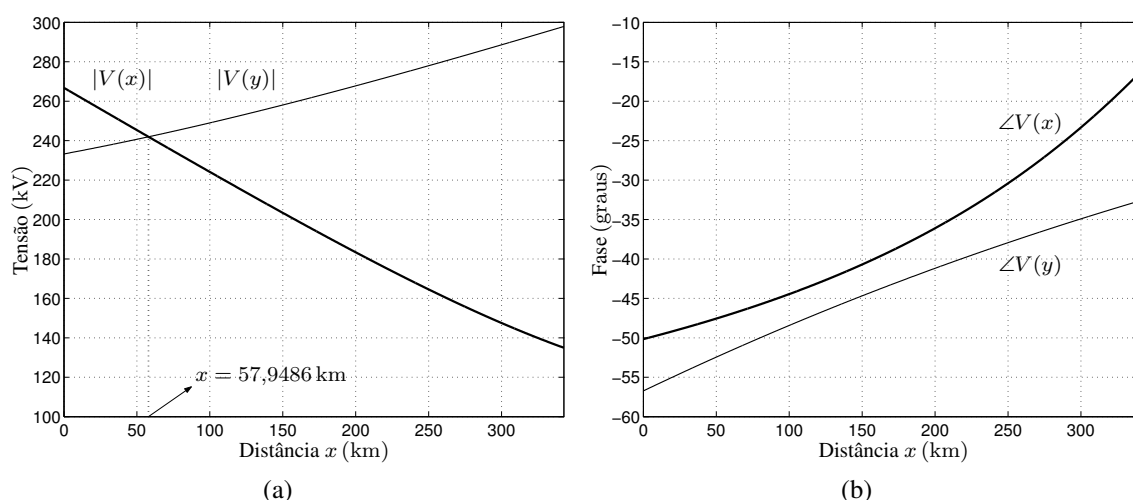


Figura 6.17: Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 1. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.

Tabela 6.37: Resultados obtidos para o Caso Real 1. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso

Parâmetro	Método I	Método II
Estimativa \hat{d}	$63,6794 + j31,3588$	57,9485 km
Erro ϵ	-3,5950 %	-5,2614 %

ciado por um eventual erro de sincronismo, apesar de que idealmente $\delta = 0$ nessa condição de falta. Tal fato também é verdadeiro para as demais condições de falta reais apresentadas ao longo desta seção. Outro ponto interessante a ser observado é que a estimativa de localização de falta do método de Johns/Jamali apresenta uma parte imaginária não-desprezável, em torno de 50 % do valor da sua parte real, o que comprova a existência de erros nos fasores e nos parâmetros da LT. Como em diversos casos simulados estudados anteriormente, o método proposto necessita de apenas duas iterações para convergir. Além disso, é interessante notar que, assim como na maioria das condições de falta simuladas apresentadas anteriormente, as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dessa condição de falta real apresentam um decaimento quase linear ao longo de toda a LT.

6.9.2 Caso Real 2

Como já informado, a segunda condição de falta real estudada neste trabalho (Caso Real 2) ocorre na mesma LT do Caso Real 1. Os parâmetros do Caso Real 2 são descritos na Tabela 6.38.

A Figura 6.18 apresenta as curvas de magnitude e fase de $V(x)$ e $V(y)$ dessa condição de falta real. *A priori*, tal figura sugere que o erro de localização de falta dos dois

Tabela 6.38: Parâmetros do Caso Real 2

Parâmetro	Valor
Comprimento ℓ	342,71 km
Nível de tensão	500 kV
Distância d	55 km
Distância \bar{d}	0,16
Tipo de falta	Fase-terra
Causa	Queimada

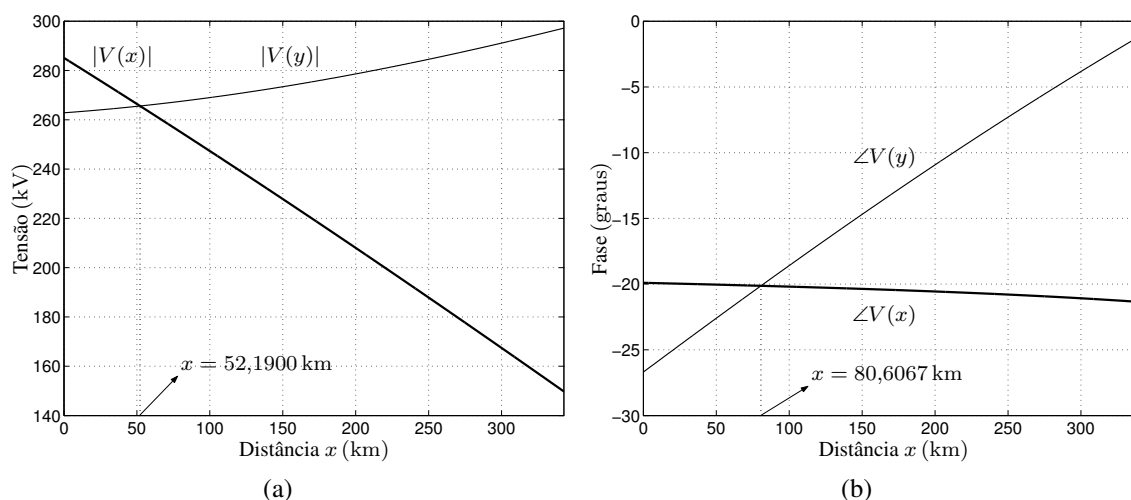


Figura 6.18: Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 2. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.

algoritmos considerados deve ser menor do que o observado no Caso Real 1, uma vez que nesse caso os pontos de interseção entre as curvas de magnitude [Figura 6.18(a)] e fase [Figura 6.18(b)] de $V(x)$ e $V(y)$ são mais próximos um do outro (a interseção entre as curvas de fase de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 2 pelo menos ocorre dentro da faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$). Note também que, a exemplo da maioria das simulações de condições de falta fase-terra apresentadas anteriormente, ambas as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ apresentam um decaimento quase linear ao longo de toda a LT.

A Tabela 6.39 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do método Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II) na localização dessa condição de falta real. Realmente, a magnitude do erro de localização de ambas as técnicas é substancialmente menor do que o verificado no Caso Real 1 (ver Tabela 6.37). Nessa condição de falta, o desempenho do método proposto é bastante superior ao do método de Johns/Jamali. Além disso, pode-se notar que ele converge corretamente para a interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ [ver Figura 6.18(a)]. Novamente, o método proposto converge em duas iterações.

Tabela 6.39: Resultados obtidos para o Caso Real 2. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso

Parâmetro	Método I	Método II
Estimativa \hat{d}	64,3586 + j13.7918	52,1900 km
Erro ϵ	2,7307 %	-0,7398 %

Tabela 6.40: Parâmetros do Caso Real 3

Parâmetro	Valor
Comprimento ℓ	342,71 km
Nível de tensão	500 kV
Distância d	317 km
Distância \bar{d}	0,92
Tipo de falta	Fase-terra
Causa	Descarga atmosférica

6.9.3 Caso Real 3

Como já mencionado, a terceira condição de falta real estudada neste trabalho ocorre na mesma LT dos Casos Reais 1 e 2. Os parâmetros do Caso Real 3 são descritos na Tabela 6.40.

A Figura 6.19 apresenta as curvas de magnitude e fase de $V(x)$ e $V(y)$ dessa condição de falta real. Novamente temos erros nos fasores e nos parâmetros da LT, uma vez que as interseções entre as curvas de magnitude [Figura 6.19(a)] e fase [Figura 6.19(b)] ocorrem em valores diferentes de x . Nessa situação, uma das curvas de magnitude, no caso $|V(y)|$, não apresenta um decaimento quase linear ao longo da LT. Tal fato já havia sido verificado na simulação de condições de falta fase-terra próximas aos extremos da LT, como nesse caso real, em que a falta está localizada próxima ao terminal remoto da LT ($\bar{d} = 0,92$).

A Tabela 6.41 mostra os resultados obtidos a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II) na localização dessa condição de falta, em que o desempenho do método proposto é levemente superior ao do método de Johns/Jamali.

Tabela 6.41: Resultados obtidos para o Caso Real 3. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso

Parâmetro	Método I	Método II
Estimativa \hat{d}	330,770 + j10,5622	329,539 km
Erro ϵ	4,0181 %	3,6590 %

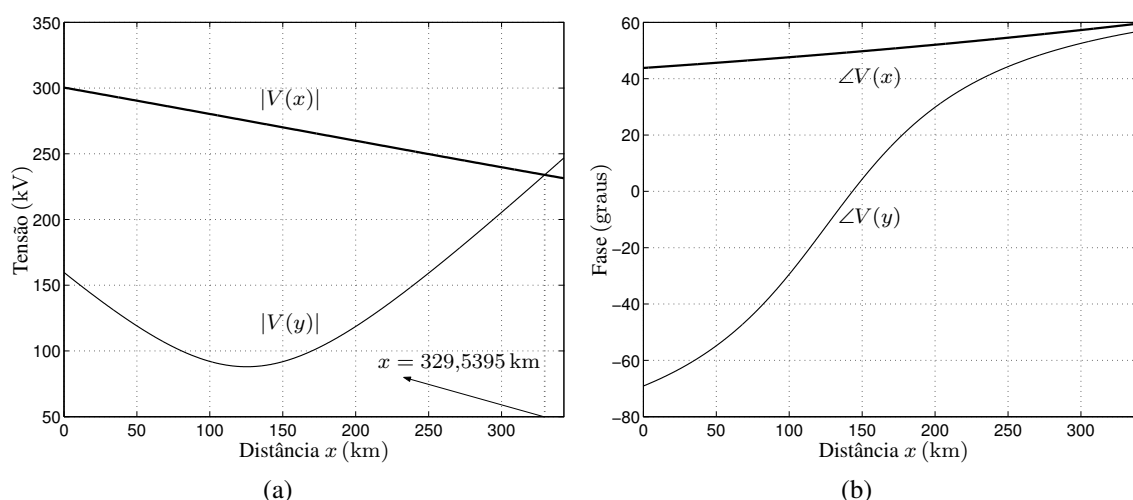


Figura 6.19: Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 3. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.

Tabela 6.42: Parâmetros do Caso Real 4

Parâmetro	Valor
Comprimento ℓ	173,2 km
Nível de tensão	500 kV
Distância d	40 km
Distância \bar{d}	0,23
Tipo de falta	Fase-terra
Causa	Desconhecida

6.9.4 Caso Real 4

A quarta condição de falta real estudada neste trabalho (Caso Real 4) ocorre em uma LT diferente dos casos reais vistos até aqui. Os parâmetros do Caso Real 4 são descritos na Tabela 6.42.

A Figura 6.20 mostra as curvas de magnitude e fase de $V(x)$ e $V(y)$ dessa condição de falta real. Pode-se observar que ambas as curvas de magnitude apresentam um decaimento quase linear ao longo da LT. Note que as curvas de fase sequer se cruzam na faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$, o que mostra a existência de erros nos fasores e nos parâmetros da LT.

A Tabela 6.43 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do método de Johns/Jamali (Método I) e do método proposto (Método II). Nesse caso, o desempenho das duas técnicas pode ser considerado equivalente. Assim como nos casos anteriores, a técnica desenvolvida converge corretamente para a interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$.

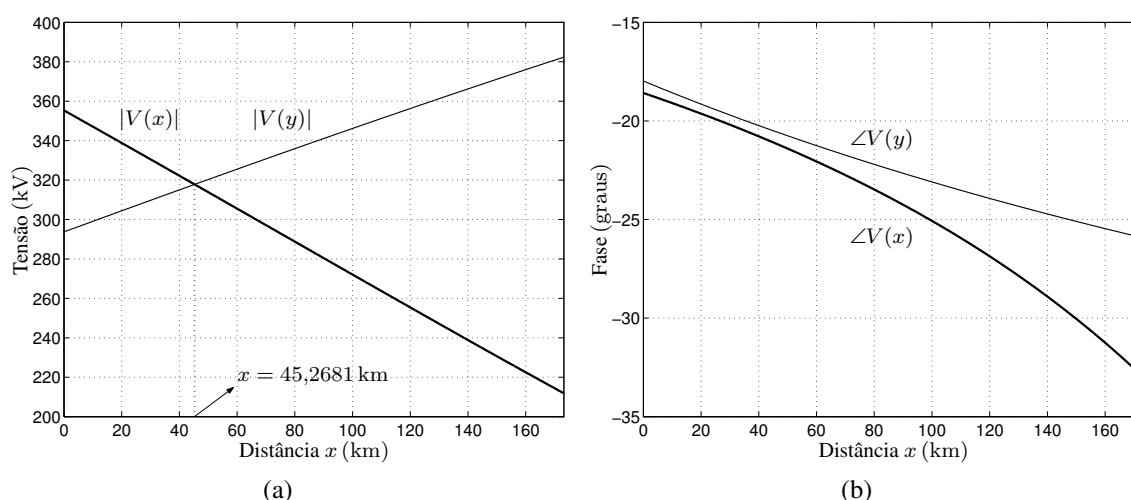


Figura 6.20: Curvas de $V(x)$ e $V(y)$ do Caso Real 4. (a) Curvas de magnitude. (b) Curvas de fase.

Tabela 6.43: Resultados obtidos para o Caso Real 4. O método proposto (II) converge em duas iterações nesse caso

Parâmetro	Método I	Método II
Estimativa \hat{d}	$45,1672 - j2,4163$	45,2681 km
Erro ϵ	2,9834 %	3,0416 %

6.9.5 Comentários Sobre os Resultados Obtidos

Como vimos, as estimativas de localização de falta dos quatro casos reais estudados apresentam erros de magnitudes não-desprezáveis, tanto para o método de Johns/Jamali quanto para o método proposto. Apesar disso, levando-se em conta a existência conjunta de erros nos fasores e nos parâmetros da LT, os erros de localização de falta obtidos estão de acordo com o estudo apresentado na Seção 6.8. Comparando as duas técnicas, o método proposto é melhor em dois casos; o método de Johns/Jamali é melhor em um caso; em um caso, o desempenho dos dois métodos é equivalente. Tal fato sugere que o desempenho de ambas as técnicas para fasores sincronizados é equivalente na localização de faltas reais. Caso os fasores sejam não-sincronizados, o desempenho do método de Johns/Jamali tende a piorar, ao passo que o do método proposto permanece inalterado, como mostrado na Seção 6.7.

Outro ponto interessante é que os quatro casos reais estudados são provenientes de faltas fase-terra. Tal fato está de acordo com a maior incidência de faltas fase-terra em LTs de EAT. Também é importante perceber que o comportamento das curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$ dos casos reais apresentados é semelhante ao verificado em casos simulados: em três casos, ambas as curvas apresentam um decaimento quase linear ao longo de toda a LT; em um caso, apenas uma das curvas não apresenta um decaimento quase linear ao longo de toda

a LT. Além disso, apesar de apresentar um erro de localização de falta de magnitude não-desprezável, o algoritmo desenvolvido converge corretamente nos quatro casos considerados para os pontos de interseção entre as curvas $|V(x)|$ e $|V(y)|$, comprovando que o erro de localização de falta surge devido à qualidade duvidosa dos fasores e dos parâmetros da LT, e não devido ao processo numérico desenvolvido em si.

6.10 Conclusões

Este capítulo apresentou os resultados de testes experimentais realizados com o método de localização de faltas proposto neste trabalho. Os dados simulados foram obtidos a partir do *software* ATP, sempre considerando operação em regime permanente senoidal a fim de evitar erros nas estimativas dos fasores de frequência fundamental. Os parâmetros localização da falta, resistência de falta, carga na LT e tipo de falta não exerceram influência negativa no desempenho do método proposto nos testes efetuados. Outro estudo realizado buscou verificar a influência de um erro de sincronismo na estimativa de localização de falta. No caso do método proposto, tal influência é nula ao passo que para o método de Johns/Jamali, ela é significativa. Além disso, a influência de erros nas magnitudes e nas fases dos fasores de frequência fundamental foi apresentada. Esses dois parâmetros podem prejudicar substancialmente o desempenho tanto do método proposto quanto do método de Johns/Jamali. Por fim, o método proposto foi comparado com o de Johns/Jamali em quatro condições de falta reais. Os resultados obtidos sugerem que para medidas sincronizadas, o desempenho do método proposto é equivalente ao do método de Johns/Jamali. Já para medidas não-sincronizadas, o desempenho do método desenvolvido neste trabalho não é afetado, ao passo que o do método de Johns/Jamali é bastante influenciado.

Capítulo 7

Conclusões e Comentários Finais

Os sistemas de potência atuais são estruturas complexas que transmitem a energia elétrica principalmente através de linhas de transmissão aéreas. A fim de aumentar o grau de confiabilidade, os sistemas de potência modernos possuem redes interligadas no nível de transmissão, o que requer um grande número de LTs. Como a geração de energia elétrica ocorre normalmente em locais distantes dos centros consumidores, essas LTs apresentam, em geral, grandes comprimentos. Logo, por serem circuito de grande porte expostos a toda sorte de intempéries, as LTs constituem os elementos de um sistema de potência mais propensos a ocorrência de faltas.

Inicialmente, as faltas em LTs eram localizadas via simples inspeção visual. Entretanto, o grande comprimento de uma linha torna tal procedimento ineficaz. Além disso, é comum uma falta ocorrer sob condições meteorológicas adversas e em locais de difícil acesso, o que dificulta ainda mais a visualização do ponto da linha sob falta. Para reduzir o tempo necessário para a localização de uma falta, localizadores de falta vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1950. A localização rápida de faltas em LTs ganha importância em ambientes desregulamentados, nos quais as empresas de transmissão são penalizadas financeiramente em função da duração de eventuais desligamentos, programados ou não.

Os métodos de localização de faltas apresentados na literatura podem ser classificados em três grandes grupos: métodos baseados em fasores de frequência fundamental, métodos baseados em transitórios de alta frequência (principalmente ondas viajantes) e métodos baseados no conhecimento. A maioria dos métodos de localização de faltas propostos são baseados nos fasores de frequência fundamental. Eles se destacam pela simplicidade e baixo custo de implementação. Por outro lado, estão sujeitos à várias fontes de erro, especialmente as técnicas baseadas em fasores de um único terminal da LT.

A principal contribuição deste trabalho foi apresentar um novo método de localização de faltas baseado em fasores dos dois terminais da LT obtidos de forma não-sincronizada. Tal característica torna menor o custo do sistema de localização de faltas, uma vez que é desnecessário o uso de um GPS para sincronizar os equipamentos de medição instalados nos

terminais local e remoto da LT. Além disso, os métodos de localização baseados em fasores não-sincronizados podem fornecer melhores resultados caso haja erros devido ao uso de diferentes taxas de amostragem ou erros de fase introduzidos pelos diversos instrumentos de medida e transdutores. O método proposto neste trabalho utiliza uma modelagem a parâmetros distribuídos para a LT e é independente do ângulo de defasagem δ e das impedâncias das fontes Z_S e Z_R . Segundo nosso conhecimento, nenhum outro método de localização de faltas baseado em fasores proposto na literatura apresenta tais características simultaneamente. Para evitar a necessidade de sincronismo, propõe-se utilizar apenas a magnitude da tensão no ponto de falta como variável de busca. Para isso, foi desenvolvido um método numérico que consiste em aproximar por retas as magnitudes das tensões calculadas a partir dos fasores medidos nos terminais S e R da linha de transmissão. Utilizando um processo de aproximações sucessivas, a localização do ponto de falta é estimada. Os resultados obtidos utilizando o método proposto mostram que ele é robusto às características de localização do ponto de falta, resistência de falta e carga na LT.

Outra contribuição importante deste trabalho foi mostrar que um método de localização de faltas baseado apenas na magnitude da tensão no ponto de falta pode apresentar erro de convergência caso existam duas soluções x_1 e x_2 pertencentes à faixa de valores $0 \leq x \leq \ell$. Foi verificado que para faltas fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra, uma das curvas de magnitude pode não mostrar um decaimento quase linear ao longo de toda a LT, podendo resultar em duas soluções x_1 e x_2 distantes uma da outra. Esses casos não oferecem maiores riscos à convergência correta do algoritmo de localização de faltas desenvolvido. Para faltas trifásicas não-sólidas, ambas as curvas de magnitude ($|V(x)|$ e $|V(y)|$) não apresentam decaimentos praticamente lineares ao longo de toda a LT. Nesses casos, podem surgir soluções x_1 e x_2 bastante próximas uma da outra, oferecendo grande risco de convergência para a solução incorreta. Para solucionar tal problema, foi desenvolvida uma técnica que consiste em melhorar a qualidade da estimativa de localização de falta inicial $d'(0)$. Utilizando tal estratégia, a ocorrência de convergência incorreta não foi mais observada. Assim, todas as faltas simuladas com o ATP neste trabalho de pesquisa foram localizadas de forma correta, com erro de localização de falta de magnitude desprezável. Além disso, o número de iterações necessário para a convergência da técnica desenvolvida é baixo, variando, na grande maioria dos casos, entre uma e três iterações.

A terceira contribuição deste trabalho foram os testes numéricos realizados. Foi mostrado que se os fasores e os parâmetros da linha são isento de erros, o erro de localização de falta da técnica desenvolvida é desprezável. Outro estudo realizado foi quanto à sensibilidade do método proposto em relação a um erro de sincronismo entre fasores e também a erros nos fasores de frequência fundamental (magnitude e fase) e nos parâmetros da LT. Em relação ao erro de sincronismo, o algoritmo implementado é completamente robusto. Já os erros nos fasores e nos parâmetros da LT são as principais fontes de erro da técnica desenvol-

vida. Como mostrado, o erro de fase dos fasores só é relevante caso a fase relativa entre os fasores de um mesmo terminal for alterada. Se essas fases forem alteradas do mesmo valor, o desempenho do algoritmo não é afetado. Já os erros de magnitude dos fasores são muito importantes caso as variações dos fasores de um terminal sejam positivas e do outro terminal, negativas. Se todas as magnitudes forem variarem na mesma proporção, o desempenho do método também não é afetado. Os desvios nos parâmetros da LT em relação aos seus valores de projeto também influenciam o desempenho do método proposto, apesar que de uma forma não tão grave quanto os erros nas magnitudes dos fasores. Os testes experimentais realizados a partir de dados de faltas reais mostraram que a técnica pode apresentar erros de localização de falta de magnitude razoável na prática, de 5% no pior caso estudado. A origem desse erro de localização são os erros nos fasores de frequência fundamental e também nos parâmetros da LT, que foram considerados iguais aos determinados na etapa de projeto da linha. Ainda assim, a técnica apresentou erros de localização com a mesma ordem de grandeza da técnica proposta por Johns e Jamali [53] para medidas sincronizadas. Para medidas não-sincronizadas, o desempenho do método proposto não é afetado, ao passo que para o método de Johns/Jamali tal fato representa uma fonte de erro a mais. Outro ponto importante é que o processo de aproximações sucessivas desenvolvido convergiu corretamente para o ponto de interseção entre as curvas de magnitude de $V(x)$ e $V(y)$ nos casos reais avaliados. Isso significa que se a qualidade dos fasores e dos parâmetros da LT for melhorada, o erro de localização de falta tende a diminuir até os valores obtidos para os casos de faltas simuladas com o ATP.

Duas propostas para trabalhos futuros podem ser consideradas. Neste trabalho, todos os experimentos foram realizados utilizando a decomposição em componentes simétricos para permitir o tratamento do sistema trifásico como um sistema monofásico (circuito de seqüência positiva). Tal transformação é perfeita para os casos considerados, uma vez que todas as LTs, simuladas e reais, são transpostas. Entretanto, um estudo interessante para o futuro é avaliar o comportamento do método considerando a adoção de uma transformação modal no lugar da decomposição em componentes simétricos, especialmente a transformação de Clarke, que é apropriada para LTs não-transpostas mas que apresentem um eixo de simetria vertical. Nesse caso, todo um estudo deve ser realizado considerando todos os possíveis tipos de falta, localizadas ao longo de LTs. Deve-se observar, principalmente, sob quais condições podem causar erros de convergência para o método desenvolvido.

A análise de sensibilidade aqui realizada segue a mesma linha adotada em outros trabalhos, que consiste em estipular desvios nas magnitudes e nas fases dos fasores bem como nos parâmetros da LT. Um possível estudo é comparar a sensibilidade das funções $V(x)$ e $V(y)$ com a das funções $|V(x)|$ e $|V(y)|$, a fim de definir matematicamente qual técnica, a proposta neste trabalho ou a de Johns/Jamali, é mais sensível a erros nos fasores e nos parâmetros da LT.

Apêndice A

Componentes Simétricos e Componentes de Clarke

As Seções 3.2 e 3.3 abordam de forma sucinta duas transformações matemáticas bastante utilizadas por algoritmos de localização de faltas: a decomposição em componentes simétricos e a transformação de Clarke. Pela importância que possuem, este apêndice apresenta essas duas transformações mais detalhadamente.

A.1 Matrizes Impedância e Admitância

Considere uma LT trifásica cujas tensões e correntes nas fases do seu terminal local são $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]^T$ e $\mathbf{I}_f = [I_A, I_B, I_C]^T$. As variações das tensões e correntes ao longo das fases dessa LT podem ser determinadas através de

$$-\frac{\partial \mathbf{V}_f}{\partial x} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_f \quad (\text{A.1})$$

e

$$-\frac{\partial \mathbf{I}_f}{\partial x} = \mathbf{Y} \mathbf{V}_f \quad (\text{A.2})$$

onde \mathbf{Z} é matriz impedância da LT e \mathbf{Y} é matriz admitância da LT, ambas por unidade de comprimento. Para uma LT trifásica, a matriz \mathbf{Z} possui a seguinte forma:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_B & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_C \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

onde os elementos da diagonal principal representam as impedâncias próprias de cada fase da linha e os demais componentes representam as impedâncias mútuas da LT. A matriz \mathbf{Y} possui uma estrutura semelhante à da matriz \mathbf{Z} , com a diferença de ser formada pelas admitâncias

próprias e mútuas da LT. Assim,

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_B & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_C \end{bmatrix}. \quad (\text{A.4})$$

Através de (A.1) e (A.3), pode-se constatar que a variação da tensão na fase A de uma linha trifásica é dada por

$$-\frac{\partial V_A}{\partial x} = Z_A I_A + Z_{AB} I_B + Z_{AC} I_C. \quad (\text{A.5})$$

Essa expressão mostra que a variação de tensão ao longo da fase A de uma LT depende de I_A e de Z_A ; de I_B e de Z_{AB} ; de I_C e de Z_{AC} ¹. Isso significa que cada fase de uma LT é magneticamente acoplada às demais devido à existência das impedâncias mútuas da linha. Essa mesma conclusão pode ser estendida para a variação das correntes em cada uma das fases da linha, pois (A.2) e (A.4) são análogas, respectivamente, a (A.1) e (A.3).

Para evitar a necessidade de analisar circuitos magneticamente acoplados, pode-se utilizar a decomposição em componentes simétricos, que decompõe uma grandeza trifásica em componentes de seqüência positiva (índice 1), negativa (índice 2) e zero (índice 0). Outra possibilidade é utilizar uma transformação modal, que decompõe uma tensão ou corrente trifásica em dois modos aéreos (índices 1 e 2) e um modo terra (índice 0). Se a transformação considerada for adequada à linha sob análise, podem-se obter componentes perfeitamente desacoplados ou, pelo menos, componentes que na prática possam ser considerados desacoplados.

Para definir as transformações estudadas neste apêndice, considera-se que as grandezas de fase $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]^T$ e $\mathbf{I}_f = [I_A, I_B, I_C]^T$ são relacionadas aos componentes de seqüência ou componentes modais $\mathbf{V}_{md} = [V_0, V_1, V_2]^T$ e $\mathbf{I}_{md} = [I_0, I_1, I_2]^T$ através de uma matriz de transformação \mathbf{T} :

$$\mathbf{V}_f = \mathbf{T} \mathbf{V}_{md} \quad (\text{A.6})$$

e

$$\mathbf{I}_f = \mathbf{T} \mathbf{I}_{md}. \quad (\text{A.7})$$

De forma inversa, pode-se escrever

$$\mathbf{V}_{md} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{V}_f \quad (\text{A.8})$$

e

$$\mathbf{I}_{md} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{I}_f. \quad (\text{A.9})$$

¹Esse mesmo resultado é apresentado na Seção 2.4.

No domínio dos componentes de seqüência ou componentes modais, (A.1) e (A.2) podem ser escritas como

$$-\frac{\partial \mathbf{V}_{\text{md}}}{\partial x} = \mathbf{Z}_{\text{md}} \mathbf{I}_{\text{md}} \quad (\text{A.10})$$

e

$$-\frac{\partial \mathbf{I}_{\text{md}}}{\partial x} = \mathbf{Y}_{\text{md}} \mathbf{V}_{\text{md}}. \quad (\text{A.11})$$

Como o objetivo é obter componentes desacoplados, a transformação só é útil se as matrizes \mathbf{Z}_{md} e \mathbf{Y}_{md} resultantes forem diagonais (ou se puderem ser aproximadas a matrizes diagonais sem grandes erros). Essas matrizes podem ser obtidas substituindo (A.6) e (A.7) em (A.1), o que resulta em

$$-\frac{\partial (\mathbf{T} \mathbf{V}_{\text{md}})}{\partial x} = \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}_{\text{md}}. \quad (\text{A.12})$$

Sabendo que \mathbf{T} é independente de x e realizando as devidas manipulações matemáticas, (A.12) pode ser rescrita como

$$-\frac{\partial \mathbf{V}_{\text{md}}}{\partial x} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}_{\text{md}}. \quad (\text{A.13})$$

Comparando (A.13) e (A.10), obtém-se

$$\mathbf{Z}_{\text{md}} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}. \quad (\text{A.14})$$

Tal matriz representa a matriz impedância dada por (A.3) no domínio dos componentes simétricos ou componentes modais. As mesmas conclusões podem ser obtidas para a matriz admitância, através da substituição de (A.6) e (A.7) em (A.2). Assim,

$$\mathbf{Y}_{\text{md}} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}. \quad (\text{A.15})$$

Existem diversas matrizes de transformação \mathbf{T} úteis na análise de sistema de potência trifásicos. Este apêndice apresenta duas delas: a decomposição em componentes simétricos e a transformação de Clarke, que são as mais utilizadas pelos algoritmos de localização de faltas propostos na literatura. Conforme mostrado posteriormente, essas transformações podem gerar componentes desacoplados ou não dependendo da simetria da LT.

A.2 Decomposição em Componentes Simétricos

Como mencionado na Seção 3.2, a decomposição em componentes simétricos é baseada no teorema de Fortescue apresentado em [55], que diz que um conjunto composto por N fasores desequilibrados pode ser decomposto em N conjuntos formados por N fasores equilibrados, denominados componentes simétricos dos fasores originais. A matriz de

transformação nesse caso é

$$\mathbf{T}_S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a_N^{(N-1)} & a_N^{(N-2)} & \dots & a_N^{(N-j+1)} & \dots & a_N \\ 1 & a_N^{2(N-1)} & a_N^{2(N-2)} & \dots & a_N^{2(N-j+1)} & \dots & a_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a_N^{(i-1)(N-1)} & a_N^{(i-1)(N-2)} & \dots & a_N^{(i-1)(N-j+1)} & \dots & a_N^{(i-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a_N^{(N-1)(N-1)} & a_N^{(N-1)(N-2)} & \dots & a_N^{(N-1)(N-j+1)} & \dots & a_N^{(N-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

onde $T_S(i,j)$ é o elemento da linha i e da coluna j de \mathbf{T}_S e

$$a_N = 1e^{j\frac{360^\circ}{N}} \quad (\text{A.17})$$

sendo que

$$a_N^k = a_N^{k-N}. \quad (\text{A.18})$$

De acordo com (A.17), para o caso de um sistema trifásico

$$a_3 = 1e^{j120^\circ} \quad (\text{A.19})$$

que, por simplicidade, é aqui denotado apenas por a . Assim, a matriz de transformação \mathbf{T}_S do caso trifásico é

$$\mathbf{T}_S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.20})$$

A matriz inversa, utilizada em (A.8) e (A.9), é

$$\mathbf{T}_S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}. \quad (\text{A.21})$$

Os três conjuntos de fasores equilibrados resultantes da decomposição em componentes simétricos (Figura A.1) são assim denominados:

- componentes de seqüência zero (índice 0): três fasores de mesma magnitude e em fase;
- componentes de seqüência positiva (índice 1): três fasores equilibrados e com mesma seqüência de fases dos fasores originais;
- componentes de seqüência negativa (índice 2): três fasores equilibrados e com seqüência de fases oposta à dos fasores originais.

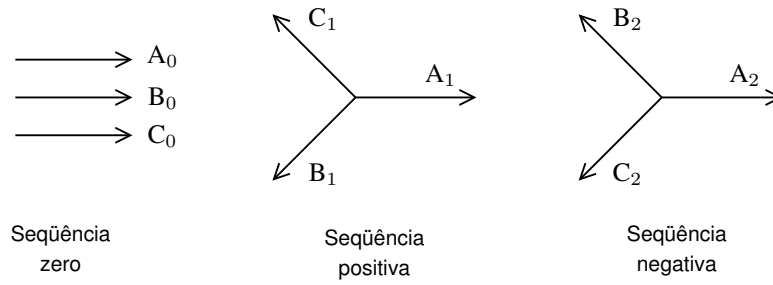


Figura A.1: Componentes de seqüência de um sistema trifásico resultantes da decomposição em componentes simétricos.

Vale ressaltar que a matriz (A.20) é definida considerando a fase A do sistema de potência como referência angular. Desse modo, os componentes de seqüências 0, 1 e 2 (V ou I) utilizados em (A.6), (A.7), (A.8) e (A.9) são relacionados com os componentes de seqüência da fase A.

A.2.1 Matrizes Impedância e Admitância no Domínio da Decomposição em Componentes Simétricos

Para a análise de LTs em falta, os componentes simétricos só são perfeitamente desacoplados se a LT for transposta. Nesse caso, as impedâncias próprias da linha são todas iguais, assim com as impedâncias mútuas, aqui denominadas Z_p e Z_m , respectivamente (ver Seção 2.4). Assim, (A.3) pode ser reescrita como

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix}. \quad (\text{A.22})$$

Substituindo (A.20), (A.21) e (A.22) em (A.14), determina-se

$$\mathbf{Z}_{\text{md}} = \begin{bmatrix} Z_p + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_p - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_p - Z_m \end{bmatrix}. \quad (\text{A.23})$$

A matriz admitância \mathbf{Y}_{md} apresenta uma estrutura semelhante a matriz \mathbf{Z}_{md} , apenas substituindo as impedâncias próprias e mútuas em (A.23) pelas respectivas admitâncias próprias e mútuas da linha.

Como (A.23) é uma matriz diagonal, a variação da tensão de uma fase de cada um dos circuitos de seqüência só depende do componente de seqüência da corrente da fase e da impedância do mesmo circuito de seqüência. Os parâmetros mútuos dos circuitos de seqüência são todos nulos, o que implica em componentes de seqüência perfeitamente desa-

coplados. Essa mesma conclusão pode ser estendida para a corrente em cada fase. Portanto, fica provado que a decomposição em componentes simétricos é útil na análise de problemas envolvendo LTs transpostas.

A.3 Transformação de Clarke

Em 1917, W. W. Lewis apresentou pela primeira vez a decomposição de grandezas trifásicas em componentes α (correspondente ao índice 1), β (correspondente ao índice 2) e 0 (daí o nome transformação $\alpha\beta 0$), no artigo “Short Circuit Currents on Grounded Neutral Systems” publicado na General Electric Revue [56]. O emprego dessa transformação modal foi difundido em 1938 após a publicação na General Electric Revue do artigo intitulado “Problems Solved by Modified Symmetrical Components”, de autoria de Edith Clarke [56]. A partir desse trabalho, a transformação $\alpha\beta 0$ passou também a ser conhecida por transformação de Clarke, em homenagem a sua autora. A transformação de Clarke foi novamente apresentada em [58].

A transformação de Clarke é obtida através da seguinte matriz de transformação:

$$\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.24})$$

A transformação inversa é dada por

$$\mathbf{T}_C^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.25})$$

É interessante notar que a matriz de transformação obtida por (A.24) não é ortonormal². Como consequência, a transformação obtida através dessa matriz não mantém as potências envolvidas inalteradas. Para obter uma versão da transformação de Clarke que seja ortonormal, pode-se definir uma nova matriz

$$\mathbf{T}'_C = a_1 \begin{bmatrix} a_2 & 1 & 0 \\ a_2 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ a_2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.26})$$

para a qual

$$\mathbf{T}'_C{}^T \mathbf{T}'_C = \mathbf{I}. \quad (\text{A.27})$$

²Uma matriz quadrada \mathbf{A} é ortonormal se $\mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{I}$, o que implica $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T$.

Substituindo (A.26) em (A.27), define-se

$$a_1 \begin{bmatrix} a_2 & a_2 & a_2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} a_1 \begin{bmatrix} a_2 & 1 & 0 \\ a_2 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ a_2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.28})$$

Multiplicando a segunda linha pela segunda coluna das matrizes do lado esquerdo de (A.28), determina-se

$$a_1^2 \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right) = 1.$$

Logo,

$$a_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (\text{A.29})$$

Multiplicando a terceira linha pela terceira coluna das matrizes do lado esquerdo de (A.28), determina-se

$$3a_1^2 a_2^2 = 1.$$

Portanto,

$$a_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}. \quad (\text{A.30})$$

Substituindo esses valores de a_1 e a_2 em (A.26), define-se uma matriz de transformação de Clarke ortonormal:

$$\mathbf{T}'_C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & 1 & 0 \\ \sqrt{2}/2 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{2}/2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.31})$$

Nesse caso, a matriz de transformação inversa é dada pela transposta de (A.31). Assim,

$$\mathbf{T}_C'^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.32})$$

Do mesmo modo que a decomposição em componentes simétricos, a transformação de Clarke gera três modos exatos (perfeitamente desacoplados) para o caso de uma linha transposta. Considere agora que a LT com matriz Z dada por (A.3) não é transposta, mas que possui um eixo de simetria vertical³. A Figura A.2 ilustra duas linhas que apresentam tal característica. Nesse caso, pode-se considerar

$$Z_{AB} = Z_{AC} = Z_{BA} = Z_{CA} = D \quad (\text{A.33})$$

³Note que não é necessário que os três condutores da LT estejam no mesmo plano horizontal; a condição estabelecida é que a LT seja simétrica verticalmente.

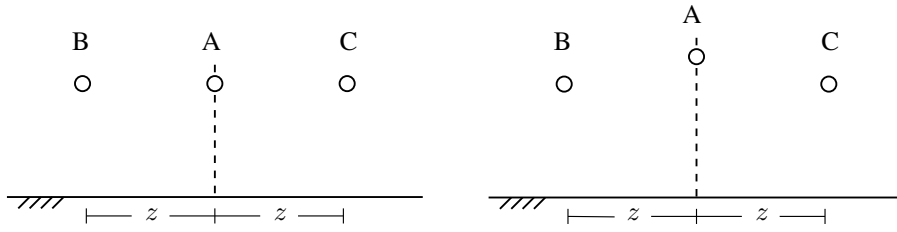


Figura A.2: Exemplos de linhas de transmissão trifásicas com simetria vertical.

e

$$Z_{BC} = Z_{CB} = E. \quad (\text{A.34})$$

Além disso, pode-se adotar

$$Z_A = A \quad (\text{A.35})$$

e

$$Z_B = Z_C = B. \quad (\text{A.36})$$

Assim, (A.3) pode ser reescrita como

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} A & D & D \\ D & B & E \\ D & E & B \end{bmatrix}. \quad (\text{A.37})$$

A decomposição em componentes simétricos não é eficaz nesse tipo de situação. Se ela for aplicada, a matriz resultante \mathbf{Z}_{md} não será diagonal como a matriz dada por (A.23). Nesse caso, uma opção conveniente é utilizar a transformação de Clarke.

A.3.1 Matrizes Impedância e Admitância no Domínio Modal Para a Transformação de Clarke

Para obter a matriz impedância no domínio da transformação de Clarke, deve-se substituir (A.31), (A.32) e (A.37) em (A.14). Assim, define-se

$$\mathbf{Z}_{\text{md}} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & Z_{10} \\ 0 & Z_2 & 0 \\ Z_{01} & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.38})$$

onde

$$Z_1 = \frac{1}{3}(2A + B - 4D - E) \quad (\text{A.39})$$

$$Z_2 = B - E \quad (\text{A.40})$$

$$Z_0 = \frac{1}{3}(A + 2B + 4D + 2E) \quad (\text{A.41})$$

$$Z_{10} = Z_{01} = \frac{\sqrt{2}}{3}(A - B + D - E). \quad (\text{A.42})$$

Como pode-se constatar através de (A.38), o modo 2 é completamente desacoplado dos demais. Já os modos 1 e 0 possuem os termos mútuos não-nulos Z_{10} e Z_{01} , respectivamente. Entretanto, pode-se verificar através de (A.42) que tais termos são formados por duas diferenças entre impedâncias próprias e mútuas, o que os tornam desprezáveis na prática [102]. Por esse motivo, os modos 1 e 0 são classificados como quase-modos. Sendo assim, nesse tipo de linha pode-se utilizar a transformação de Clarke e considerar que os três modos são desacoplados, uma vez que tal simplificação conduz a erros insignificantes. Ainda que a linha não apresente um plano de simetria vertical, situação mais comum no nível de subtransmissão, a transformação de Clarke ainda leva a resultados adequados [62]. Como já mencionado anteriormente, no caso de LTs transpostas a matriz (A.38) é diagonal, não envolvendo qualquer simplificação nesse tipo de situação.

A.4 Componentes de Clarke em Função dos Componentes Simétricos

É interessante determinar a relação existente entre os componentes simétricos e os componentes modais, para que se possa definir diferenças e semelhanças entre essas duas transformações. Para tal, considere inicialmente a aplicação da transformação de Clarke aplicada a uma tensão trifásica $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]^T$, que é dada por

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \mathbf{T}_C \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}. \quad (\text{A.43})$$

Essa mesma tensão pode ser escrita em função dos seus componentes simétricos através de

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \mathbf{T}_S \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.44})$$

Note que estamos usando os índices α e β para diferenciar os dois modos aéreos [V_α e V_β em (A.43)] dos componentes simétricos de seqüências positiva e negativa [V_1 e V_2 em (A.44)]. Igualando os lados direitos de (A.43) e (A.44) e realizando as devidas manipulações

matemáticas, obtém-se

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{T}_C^{-1} \mathbf{T}_S \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.45})$$

Fazendo a multiplicação de \mathbf{T}_C^{-1} , dada por (A.25), por \mathbf{T}_S , dada por (A.20), em (A.45) e sabendo que

$$a = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{A.46})$$

chega-se a

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.47})$$

Logo, pode-se escrever as seguintes relações entre os componentes de Clarke e os componentes simétricos de uma tensão (ou corrente) trifásica:

$$\begin{cases} V_0 = V_0 \\ V_\alpha = V_1 + V_2 \\ V_\beta = -j(V_1 - V_2) \end{cases}. \quad (\text{A.48})$$

Algumas conclusões interessantes podem ser obtidas das relações apresentadas em (A.48). É possível verificar que o componente de Clarke de modo 0 (modo terra) corresponde ao próprio componente simétrico de seqüência zero. Além disso, pode-se ver que os componentes de Clarke dos modos α e β são componentes em quadratura. Uma diferença interessante entre as duas transformações é que uma grandeza trifásica equilibrada possui apenas componentes de seqüência positiva; por outro lado, essa mesma grandeza possui tanto componentes no modo α quanto no modo β .

De forma inversa a (A.47), pode-se definir

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}j \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2}j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.49})$$

de onde conclui-se que

$$\begin{cases} V_0 = V_0 \\ V_1 = \frac{1}{2}(V_\alpha + jV_\beta) \\ V_2 = -\frac{1}{2}(V_\alpha - jV_\beta) \end{cases}. \quad (\text{A.50})$$

Como exemplo, vamos considerar o caso de uma tensão trifásica $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]^T$

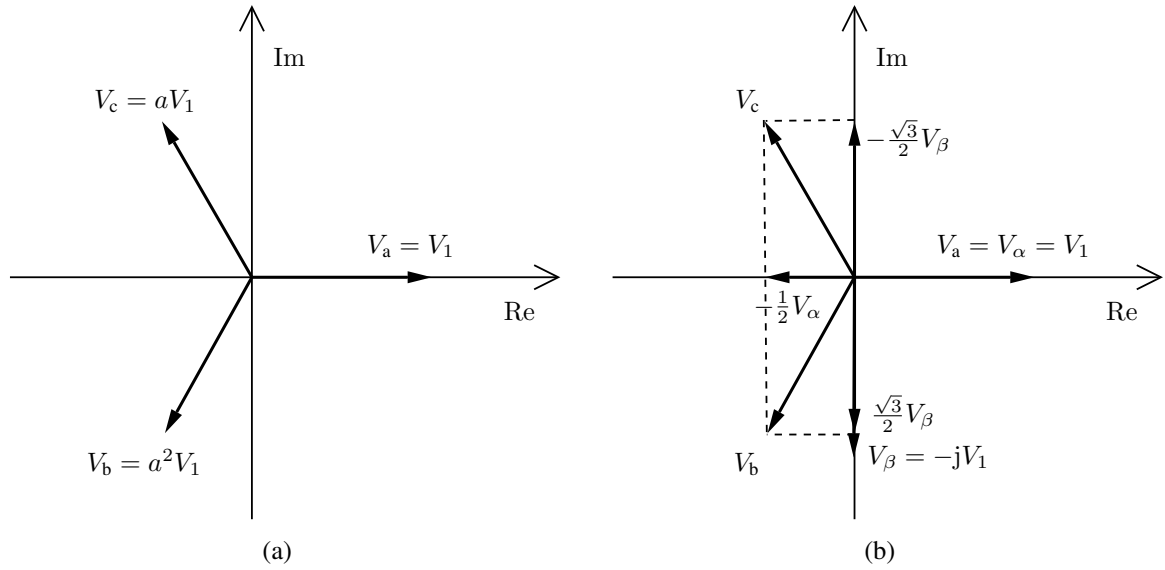


Figura A.3: Decomposição de uma tensão trifásica V_f equilibrada. (a) Componentes simétricos. (b) Componentes de Clarke.

equilibrada. Utilizando em (A.6) a matriz dada por (A.20), tem-se

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.51})$$

Sabendo que nesse caso V_A , V_B e V_C são formados apenas por componentes de seqüência positiva ($V_0 = V_2 = 0$), obtém-se as seguintes relações:

$$\begin{cases} V_A = V_1 \\ V_B = a^2 V_1 \\ V_C = a V_1 \end{cases} \quad (\text{A.52})$$

Tais relações são representadas graficamente no plano complexo da Figura A.3(a), no qual se verifica que a decomposição em componentes simétricos decompõe uma grandeza trifásica em componentes defasados de 120° .

Antes de aplicar a transformação de Clarke na tensão $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]^T$, é interessante escrever V_0 , V_α e V_β em função dos componentes simétricos dessa grandeza trifásica. Através de (A.48) obtém-se

$$\begin{cases} V_0 = 0 \\ V_\alpha = V_1 \\ V_\beta = -j V_1 \end{cases} \quad (\text{A.53})$$

Os componentes V_α e V_β podem ser vistos no plano complexo da Figura A.3(b). Diferentemente da decomposição em componentes simétricos, verifica-se graficamente que os modos

α e β constituem dois eixos em quadratura. Aplicando agora a transformação de Clarke na mesma tensão trifásica $\mathbf{V}_f = [V_A, V_B, V_C]^T$ equilibrada, determina-se

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}. \quad (\text{A.54})$$

Dessa relação matricial extrai-se as seguintes equações:

$$\begin{cases} V_A = V_\alpha \\ V_B = -\frac{1}{2}V_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \\ V_C = -\frac{1}{2}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \end{cases} \quad (\text{A.55})$$

as quais são mostradas graficamente no plano complexo da Figura A.3(b). Pode-se verificar que as tensões V_A , V_B e V_C são compostas por componentes ortogonais α e β .

Apêndice B

Circuitos de Seqüência

Como pode ser visto ao longo deste trabalho, os circuitos de seqüência são constantemente utilizados pelos métodos de localização de faltas baseados em fasores. Por esse motivo, este apêndice destaca a utilização desses circuitos na análise de um sistema como o representado na Figura B.1, objeto de estudo deste trabalho (mostrado também na Figura 2.1). Apenas dois tipos de elemento constituem esse modelo de sistema de potência trifásico: o gerador síncrono e a LT. Sendo assim, somente os circuitos de seqüência desses componentes precisam ser aqui estudados. Na realidade, as fontes de tensão com impedâncias série Z_S e Z_R ligadas nos terminais S e R da LT representam os equivalentes Thévenin dos circuitos ali conectados. Apesar disso, iremos incluir os circuitos de seqüência de um gerador síncrono nessa análise. Vale destacar que estudos dessa natureza mais detalhados podem ser encontrados em diversas publicações, tais como [13], [14] e [105].

B.1 Circuitos de Seqüência de Um Gerador Síncrono e de Uma Linha de Transmissão

Considere o gerador síncrono conectado em Y ilustrado na Figura B.2, cujo neutro é ligado à malha de terra da subestação de energia elétrica através de uma impedância Z_n . A função dessa impedância de aterramento é limitar a corrente de curto-circuito quando da

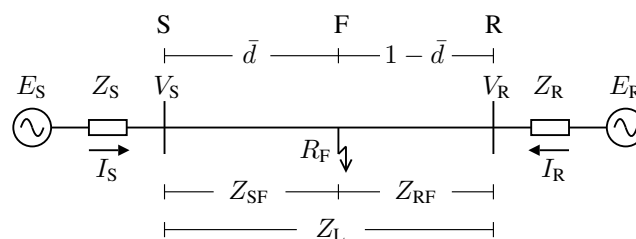


Figura B.1: Diagrama unifilar de uma linha de transmissão em falta.

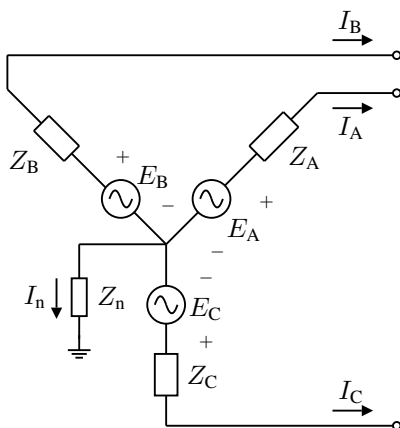


Figura B.2: Gerador síncrono.

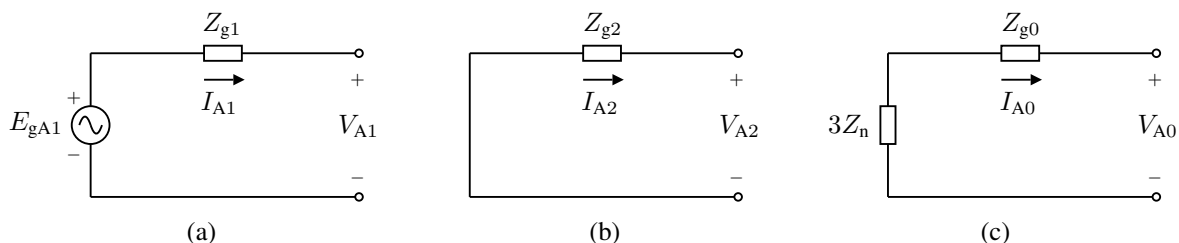


Figura B.3: Circuitos de seqüência de um gerador síncrono. (a) Circuito de seqüência positiva. (b) Circuito de seqüência negativa. (c) Circuito de seqüência zero.

ocorrência de uma falta fase-terra nos terminais do gerador. Os circuitos de seqüência por fase (fase A) desse gerador são apresentados na Figura B.3. Como um gerador síncrono é projetado para produzir tensões internas E_A , E_B e E_C formadas somente por componentes de seqüência positiva, apenas o circuito de seqüência positiva é alimentado por uma fonte de tensão, cujo valor corresponde à tensão de fase no terminal do gerador girando a vazio. Em geral, as impedâncias dos circuitos de seqüência de um gerador síncrono apresentam valores diferentes, sendo $Z_1 > Z_2 > Z_0$ [13]. Portanto, a impedância Z_1 , que em regime permanente é chamada de impedância síncrona, é a maior de todas. Através da Figura B.2 pode-se constatar que a queda de tensão na impedância de aterramento é dada por $Z_n I_n$. Como a corrente de neutro é

$$I_n = I_A + I_B + I_C = 3I_0,$$

essa queda de tensão pode ser expressa como $3Z_n I_0$. Para representar esse efeito, acrescenta-se uma impedância de valor $3Z_n$ em série com Z_{g0} no circuito de seqüência zero de um gerador síncrono [Figura B.3(c)].

Por simplicidade, desconsideramos os parâmetros em derivação dos circuitos de seqüência de uma LT. Como mostrado no Apêndice A, a matriz impedância de uma LT

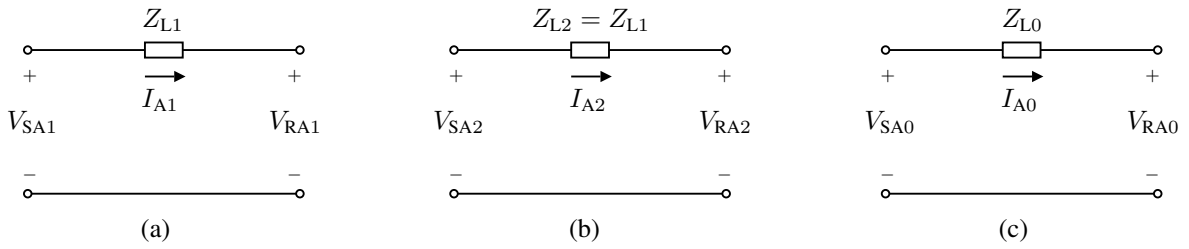


Figura B.4: Circuitos de seqüência de uma linha de transmissão. (a) Circuito de seqüência positiva. (b) Circuito de seqüência negativa. (c) Circuito de seqüência zero.

transposta representada no domínio da decomposição em componentes simétricos é dada por

$$\mathbf{Z}_S = \begin{bmatrix} Z_p + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_p - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_p - Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{L0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{L2} \end{bmatrix}, \quad (\text{B.1})$$

com Z_p e Z_m representando as impedâncias próprias e mútuas da LT, respectivamente. Utilizando \mathbf{Z}_S podem-se calcular os componentes de seqüência da queda de tensão ao longo da LT (fase A) através de

$$\begin{bmatrix} V_{SA0} - V_{RA0} \\ V_{SA1} - V_{RA1} \\ V_{SA2} - V_{RA2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{L0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{L2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.2})$$

Por exemplo, o componente de seqüência positiva da queda de tensão na fase A da LT é

$$V_{SA1} - V_{RA1} = Z_{L1} I_{A1}. \quad (\text{B.3})$$

Para obter tal relação, a estrutura do circuito de seqüência positiva da linha deve ser a mostrada na Figura B.4(a). Como as relações entre as quedas de tensão e correntes de seqüências negativa e zero são análogas à expressão (B.3), os demais circuitos de seqüência de uma LT apresentam a mesma topologia do circuito de seqüência positiva, como mostram as Figuras B.4(b) e B.4(c).

A impedância de seqüência positiva de uma LT pode ser obtida via ensaio ou, mais comumente, por cálculos que levam em conta as características dos condutores e a geometria da linha [13], [14], [51]. Por ser um componente de natureza estática, as impedâncias de seqüências positiva e negativa de uma LT são iguais, como mostra a Figura B.4(b). A corrente de seqüência zero pode fluir por caminhos de características variadas, tais como terrenos com diferentes resistividades. Conseqüentemente, a impedância de seqüência zero de uma LT é a que apresenta o valor mais impreciso. Sendo assim, deve-se evitar a utilização do circuito de seqüência zero em métodos de localização de faltas baseados em fasores.

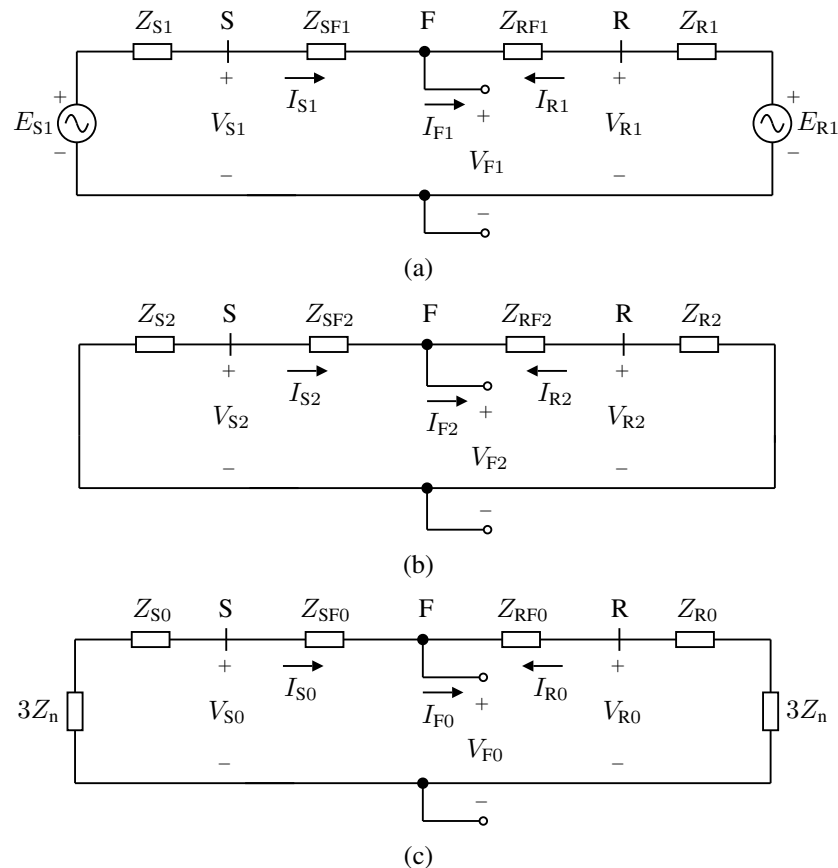


Figura B.5: Circuitos de seqüência do sistema trifásico da Figura B.1. (a) Circuito de seqüência positiva. (b) Circuito de seqüência negativa. (c) Circuito de seqüência zero.

B.2 Circuitos de Seqüência do Sistema Completo

Definidos os circuitos de seqüência de um gerador síncrono e de uma LT, podem-se agora determinar os circuitos de seqüência do modelo de sistema trifásico mostrado na Figura B.1. Considerando a ocorrência de uma falta no ponto F, os circuitos de seqüência por fase desse sistema são os mostrados na Figura B.5. Diferentemente das Figuras B.3 e B.4, o índice “A” (referente à fase A) foi excluído dos fasores de tensão e corrente de seqüência apresentados na Figura B.5 a fim de simplificar a notação de tais variáveis. O circuito de seqüência da Figura B.5(a) é o de maior importância neste trabalho por ser utilizado pelo método de localização de faltas aqui apresentado, bem como por outros métodos de duas pontas propostos na literatura [84]. Como mostra a Seção 4.4.4, a idéia de tais abordagens é considerar que o componente simétrico de seqüência positiva da tensão no ponto F pode ser calculado tanto através dos fasores de seqüência positiva do terminal S quanto dos fasores de seqüência positiva do terminal R da linha. A única diferença é que o método aqui proposto adota uma modelagem a parâmetros distribuídos para a LT em vez de utilizar o circuito a parâmetros concentrados ilustrado na Figura B.5(a) (ver Seção 2.3).

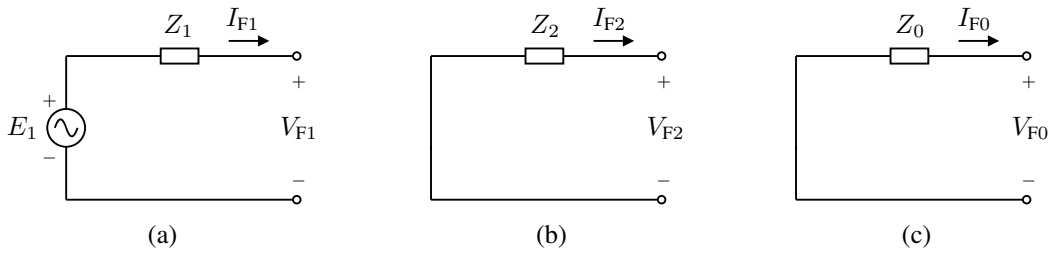


Figura B.6: Equivalentes Thévenin dos circuitos de seqüência da Figura B.5. (a) Circuito equivalente de seqüência positiva. (b) Circuito equivalente de seqüência negativa. (c) Circuito equivalente de seqüência zero.

B.3 Conexão dos Circuitos de Seqüência

De acordo com o tipo de falta ocorrida na LT, os circuitos de seqüência da Figura B.5 devem ser conectados de maneiras diferentes. Para simplificar a representação dessas ligações, utilizamos os equivalentes Thévenin desses circuitos de seqüência vistos do ponto de falta F mostrados na Figura B.6.

Faltas fase-terra

Considere a ocorrência de uma falta do tipo fase A-terra no sistema da Figura B.1. Nesse caso, os circuitos de seqüência da Figura B.6 devem ser ligados em série, como mostra a Figura B.7. Assim,

$$I_{F0} = I_{F1} = I_{F2} = \frac{E_1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_F}. \quad (\text{B.4})$$

A corrente de falta da fase A é

$$I_{FA} = I_{F0} + I_{F1} + I_{F2} = 3I_{F1}. \quad (\text{B.5})$$

As correntes de falta das demais fases são calculadas através das relações de (3.5) (ver Seção 3.2). Assim, determina-se

$$I_{FB} = I_{F0} + a^2 I_{F1} + a I_{F2} = (1 + a^2 + a)I_{F1} = 0 \quad (\text{B.6})$$

e

$$I_{FC} = I_{F0} + a I_{F1} + a^2 I_{F2} = (1 + a + a^2)I_{F1} = 0, \quad (\text{B.7})$$

o que realmente corresponde a uma falta do tipo fase A-terra.

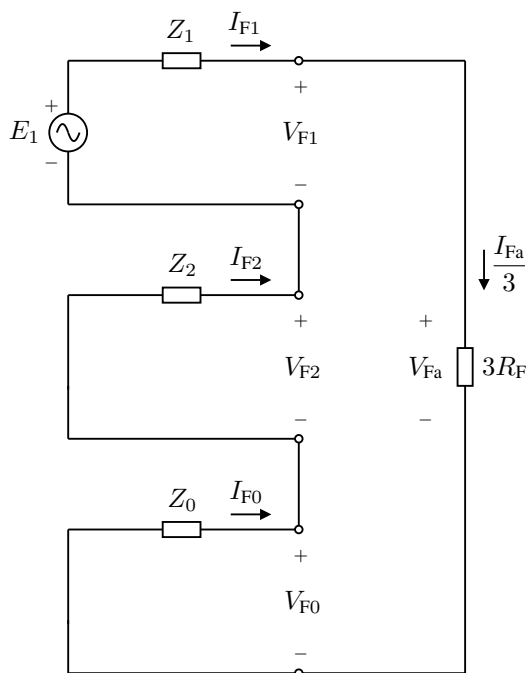


Figura B.7: Ligação dos circuitos de seqüência para faltas fase-terra.

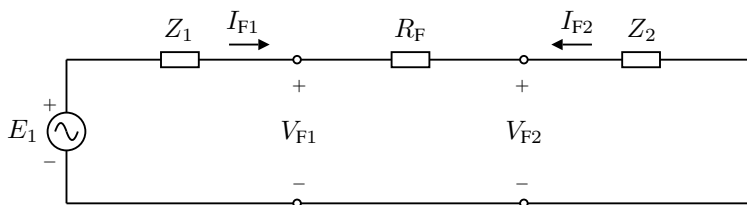


Figura B.8: Ligação dos circuitos de seqüência para faltas fase-fase.

Faltas fase-fase

Considere agora o surgimento de uma falta entre as fases B e C do sistema da Figura B.1. Nesse caso, os circuitos de seqüência são ligados da forma mostrada na Figura B.8. Como uma falta desse tipo não é aterrada, o circuito de seqüência zero não consta dessa ligação.

Analisando o circuito da Figura B.8, pode-se verificar que $I_{F0} = 0$ e $I_{F1} = -I_{F2}$. Calculando os componentes de fase da corrente de falta, determina-se

$$I_{FA} = I_{F0} + I_{F1} + I_{F2} = 0, \quad (\text{B.8})$$

$$I_{FB} = I_{F0} + a^2 I_{F1} + a I_{F2} = (a^2 - a) I_{F1} \quad (\text{B.9})$$

e

$$I_{FC} = I_{F0} + a I_{F1} + a^2 I_{F2} = (a - a^2) I_{F1} = -I_{FB}. \quad (\text{B.10})$$

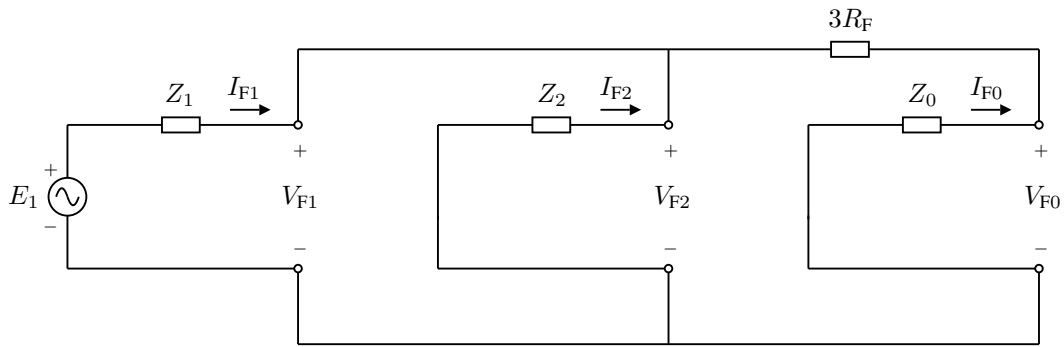


Figura B.9: Ligação dos circuitos de seqüência para faltas fase-fase-terra.

Essa condição ($I_{FA} = 0$ e $I_{FA} = -I_{FB}$) realmente corresponde a uma falta entre as fases B e C da LT.

Faltas fase-fase-terra

Considere agora uma falta entre as fases B e C do sistema da Figura B.1 aterrada através de uma resistência R_F . Nesse caso, os circuitos de seqüência da Figura B.6 devem ser ligados em paralelo, como mostra a Figura B.9. Diferentemente do caso anterior, o circuito de seqüência zero também entra na ligação pelo fato de a falta envolver a terra.

Observando o circuito de seqüência da Figura B.9, constata-se que

$$I_{FA} = I_{F0} + I_{F1} + I_{F2} = 0, \quad (\text{B.11})$$

pois a fase A não apresenta defeito.

Faltas trifásicas

No caso de uma falta trifásica, o sistema da Figura B.1 continua operando de forma balanceada. Sendo assim, ele não apresenta componentes de seqüências negativa ou zero; apenas componentes de seqüência positiva. Dessa forma, o único circuito utilizado nesse tipo de falta é o de seqüência positiva, como mostra a Figura B.10.

Fica claro que devido à ausência de componentes de seqüências negativa e zero na Figura B.10, os componentes de fase da corrente de falta são

$$I_{FA} = I_{F1}, \quad (\text{B.12})$$

$$I_{FB} = a^2 I_{F1} \quad (\text{B.13})$$

e

$$I_{FC} = a I_{F1}, \quad (\text{B.14})$$

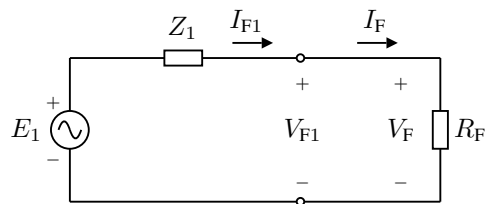


Figura B.10: Ligação dos circuitos de seqüência para faltas trifásicas.

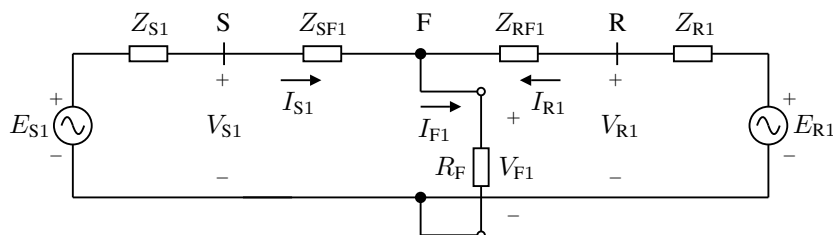


Figura B.11: Circuito de seqüência positiva original, utilizado na análise de uma falta trifásica.

o que corresponde a três fases realmente em equilíbrio.

Considere agora o circuito mostrado na Figura B.11, que é equivalente ao da Figura B.10 só que utilizando o circuito de seqüência positiva da Figura B.5(a) em vez do seu equivalente Thévenin. Essa rede é aqui destacada por ser utilizada na Seção 4.4.1 (Figura 4.5), para auxiliar na dedução do princípio básico de funcionamento dos métodos baseados em fasores de um terminal. Como mostrado naquela seção, a determinação da impedância aparente vista do terminal S

$$Z_a = \frac{V_{S1}}{I_{S1}} \quad (\text{B.15})$$

considerando esse tipo de falta equilibrada é bastante facilitada, pois pode ser realizada através desse circuito equivalente monofásico. Note que nos casos anteriores tal fato não ocorre, pois os circuitos de seqüência negativa e zero devem entrar na dedução da impedância aparente vista pelo terminal S da LT.

Apêndice C

Determinação da Impedância Z_{SF1} Para a Condição de Falta Sólida

Na Seção 4.4.1 foi apresentada a Tabela 4.1, que define as expressões para o cálculo da impedância de seqüência positiva Z_{SF1} para diferentes tipos de faltas sólidas a partir dos fasores de tensão e corrente medidos no terminal S da linha. Para facilitar a leitura deste apêndice, essa tabela está repetida na Tabela C.1, onde I_r representa a corrente residual dada por

$$I_r = I_A + I_B + I_C = 3I_0 \quad (C.1)$$

e

$$k_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}. \quad (C.2)$$

O objetivo deste apêndice é demonstrar a origem das expressões apresentadas na Tabela C.1 (ou Tabela 4.1), oriundas da análise da LT faltosa considerando as suas impedâncias próprias e mútuas.

Tabela C.1: Expressões para o cálculo da impedância de seqüência positiva do trecho SF (Z_{SF1}) de uma linha de transmissão com falta sólida

Tipo de falta	Impedância Z_{SF1}
Fase A-terra	$V_A / (I_A + k_0 I_r)$
Fase B-terra	$V_B / (I_B + k_0 I_r)$
Fase C-terra	$V_C / (I_C + k_0 I_r)$
Fase A-B ou fase A-B-terra	V_{AB} / I_{AB}
Fase B-C ou fase B-C-terra	V_{BC} / I_{BC}
Fase C-A ou fase C-A-terra	V_{CA} / I_{CA}
Trifásica	V_{AB} / I_{AB} ou V_{BC} / I_{BC} ou V_{CA} / I_{CA}

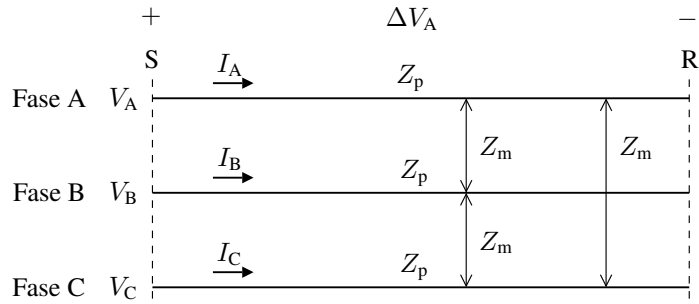


Figura C.1: Linha de transmissão transposta com impedâncias próprias Z_p e mútuas Z_m .

C.1 Variação da Tensão ao Longo da Linha de Transmissão

Considere a LT trifásica transposta ilustrada na Figura C.1, com fases A, B e C. Por simplicidade, essa figura, bem como as demais figuras deste capítulo, não ilustra o procedimento de transposição de fases, que pode ser visto na Figura 2.7 da Seção 2.4. Novamente, vamos considerar que as impedâncias próprias dessa LT são

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z_p$$

e que as impedâncias mútuas são dadas por

$$Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z_m.$$

Por ser um sistema magneticamente acoplado, a queda de tensão ao longo de cada fase dessa linha é função das três correntes de fase. Por exemplo, a queda de tensão ΔV_A que surge ao longo do condutor da fase A da LT é dada por

$$\Delta V_A = Z_p I_A + Z_m (I_B + I_C). \quad (\text{C.3})$$

Entretanto, é mais usual especificar uma LT em função das suas impedâncias de seqüência positiva e de seqüência zero. Assim, é interessante determinar as expressões de Z_p e Z_m em função de Z_{L0} e Z_{L1} , a fim de expressar (C.3) em termos das impedâncias de seqüência da linha.

Para tal, considere primeiramente uma condição de falta trifásica no terminal R da LT. Como nessa situação a linha continua operando de forma balanceada, $I_A + I_B + I_C = 0$ ou

$$I_B + I_C = -I_A. \quad (\text{C.4})$$

Substituindo esse resultado em (C.3) e fazendo as devidas manipulações matemáticas, chega-

se a

$$\Delta V_A = (Z_p - Z_m)I_A. \quad (C.5)$$

Como a falta é equilibrada, ΔV_A e I_A possuem somente componentes de seqüência positiva (ver Apêndice B). Assim, pode-se concluir através de (C.5) que

$$Z_p - Z_m = Z_{L1}. \quad (C.6)$$

Admita agora uma situação na qual todas as corrente de fase são iguais ($I_A = I_B = I_C$). Nesse caso, pode-se escrever

$$I_B + I_C = 2I_A. \quad (C.7)$$

Substituindo (C.7) em (C.3) e fazendo as devidas manipulações matemáticas, determina-se

$$\Delta V_A = (Z_p + 2Z_m)I_A. \quad (C.8)$$

Nesse caso, ΔV_A e I_A são fasores de seqüência zero, pois $I_A = I_B = I_C$. Logo,

$$Z_p + 2Z_m = Z_{L0}. \quad (C.9)$$

As expressões (C.6) e (C.9) também podem ser obtidas através da matriz (A.23) determinada no Apêndice A, que representa a matriz impedância no domínio da decomposição em componentes simétricos. A diagonal principal dessa matriz é formada por Z_{L0} , Z_{L1} e Z_{L2} (lembrando que $Z_{L1} = Z_{L2}$). Multiplicando (C.6) por dois e adicionando o resultado a (C.9), escreve-se

$$Z_p = \frac{Z_{L0} + 2Z_{L1}}{3}. \quad (C.10)$$

Subtraindo (C.6) de (C.9) e isolando a impedância mútua da LT, conclui-se que

$$Z_m = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3}. \quad (C.11)$$

Utilizando (C.10) e (C.11) é possível escrever (C.3) em função das impedâncias de seqüência positiva e de seqüência zero da LT. A fim de deixar essa nova expressão em uma forma mais simples, o primeiro passo é adicionar e subtrair no lado direito de (C.3) o termo $Z_m I_A$. Assim,

$$\Delta V_A = Z_p I_A - Z_m I_A + Z_m (I_B + I_C) + Z_m I_A. \quad (C.12)$$

Colocando I_A e Z_m em evidência, chega-se a

$$\Delta V_A = (Z_p - Z_m)I_A + Z_m (I_A + I_B + I_C). \quad (C.13)$$

Definindo a corrente residual como

$$I_r = I_A + I_B + I_C, \quad (\text{C.14})$$

e substituindo (C.6) e (C.11) em (C.13), determina-se

$$\Delta V_A = Z_{L1} I_A + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3} I_r. \quad (\text{C.15})$$

Colocando Z_{L1} em evidência, define-se

$$\Delta V_A = Z_{L1}(I_A + k_0 I_r), \quad (\text{C.16})$$

onde

$$k_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}. \quad (\text{C.17})$$

A expressão da queda tensão em outra fase da LT é semelhante a (C.16), apenas substituindo I_A pela corrente da respectiva fase. Pode-se também expressar (C.16) em função de I_0 , uma vez que

$$I_r = 3I_0. \quad (\text{C.18})$$

Nesse caso,

$$\Delta V_A = Z_{L1}(I_A + k_0 3I_0). \quad (\text{C.19})$$

C.2 Expressões Para o Cálculo da Impedância Z_{SF1}

Como mostra a Tabela C.1, a expressão de Z_{SF1} é função do tipo de falta sólida ocorrida na linha. Logo, essas expressões devem ser deduzidas para cada uma dessas possíveis situações.

Faltas Fase-Terra

Considere o caso de uma falta sólida do tipo fase A-terra, como mostra a Figura C.2. Nesse caso, a queda de tensão ocorrida no condutor da fase A no trecho entre o terminal S e o ponto de falta F deve ser calculada considerando que a impedância desse trecho é $Z_{SF1} = \bar{d}Z_{L1}$. Substituindo em (C.16) Z_{L1} por Z_{SF1} , determina-se

$$\Delta V_A = Z_{SF1}(I_A + k_0 I_r). \quad (\text{C.20})$$

É interessante notar que apesar de (C.20) ser obtida substituindo Z_{L1} por $Z_{SF1} = \bar{d}Z_{L1}$, o parâmetro k_0 continua sendo função das impedâncias da LT, pois fazendo a mesma conside-

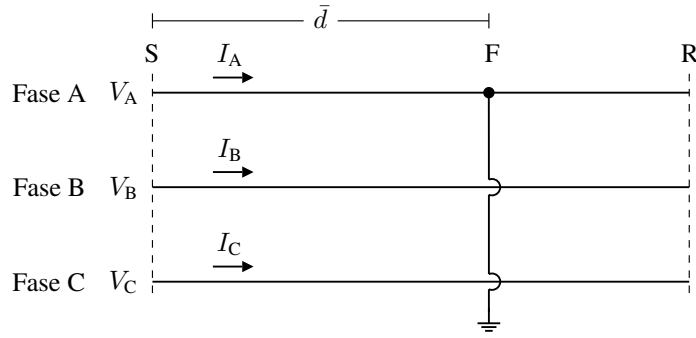


Figura C.2: Linha de transmissão transposta com falta sólida do tipo fase-terra (fase A). Nesse caso, $V_{FA} = 0$.

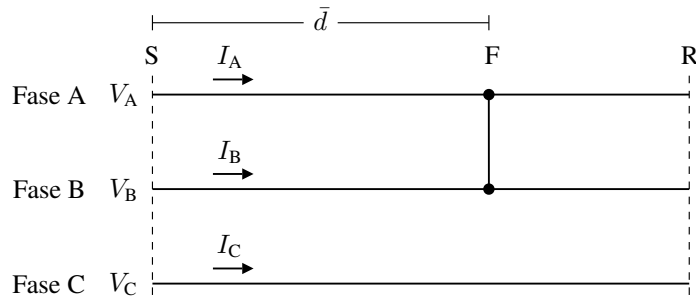


Figura C.3: Linha de transmissão transposta com falta sólida do tipo fase-fase (fases A e B). Nesse caso, $I_A = -I_B$ e $V_{FA} = V_{FB}$.

ração em (C.17) chega-se a

$$\frac{\bar{d}Z_{L0} - \bar{d}Z_{L1}}{3\bar{d}Z_{L1}} = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}} = k_0. \quad (\text{C.21})$$

Como a tensão da fase A no ponto F é nula, ΔV_A representa a própria tensão V_A .

Assim,

$$V_A = Z_{SF1}(I_A + k_0 I_r). \quad (\text{C.22})$$

Portanto,

$$Z_{SF1} = \frac{V_A}{I_A + k_0 I_r}. \quad (\text{C.23})$$

Para faltas das outras fases para a terra, Z_{SF1} é determinada de maneira idêntica bastando utilizar em (C.23) as respectivas correntes e tensões de fase, como mostra a Tabela C.1.

Faltas Fase-Fase ou Fase-Fase-Terra

Considere agora o caso de uma falta sólida entre as fases A e B, como mostra a Figura C.3. Nesse caso, a tensão das fases sob falta no ponto F é $V_{FA} = V_{FB}$. Portanto, as tensões das fases A e B no terminal S da LT são dadas por $V_A = \Delta V_A + V_{FA}$ e $V_B = \Delta V_B + V_{FB}$.

Substituindo nessas equações as expressões de ΔV_A e ΔV_B , determina-se

$$V_A = \bar{d}Z_p I_A + \bar{d}Z_m(I_B + I_C) + V_{FA} \quad (C.24)$$

e

$$V_B = \bar{d}Z_p I_B + \bar{d}Z_m(I_A + I_C) + V_{FB}. \quad (C.25)$$

Como nessa situação $I_B = -I_A$ e $I_A = -I_B$, pode-se obter

$$V_A = \bar{d}(Z_p - Z_m)I_A + \bar{d}Z_m I_C + V_{FA} \quad (C.26)$$

e

$$V_B = \bar{d}(Z_p - Z_m)I_B + \bar{d}Z_m I_C + V_{FB}. \quad (C.27)$$

Fazendo $V_A - V_B$ e considerando $V_{FA} = V_{FB}$, determina-se

$$V_A - V_B = \bar{d}(Z_p - Z_m)(I_A - I_B). \quad (C.28)$$

Como $Z_p - Z_m = Z_{L1}$, pode-se escrever

$$V_{AB} = \bar{d}Z_{L1} I_{AB}. \quad (C.29)$$

Logo,

$$Z_{SF1} = \bar{d}Z_1 = \frac{V_{AB}}{I_{AB}}. \quad (C.30)$$

Considere agora o caso de uma falta do tipo fase A-fase B-terra, como a mostrada na Figura C.4. Nessa situação, pode-se observar que $V_{FA} = V_{FB} = 0$. Assim, as quedas ΔV_A e ΔV_B representam as próprias tensões V_A e V_B . Assim,

$$V_A = \bar{d}Z_p I_A + \bar{d}Z_m(I_B + I_C) \quad (C.31)$$

e

$$V_B = \bar{d}Z_p I_B + \bar{d}Z_m(I_A + I_C). \quad (C.32)$$

Fazendo $V_A - V_B$, determina-se

$$V_A - V_B = \bar{d}(Z_p - Z_m)I_A + \bar{d}(Z_m - Z_p)I_B. \quad (C.33)$$

Sabendo que $Z_p - Z_m = Z_{L1}$ e rearranjando os termos de (C.33), determina-se que Z_{SF1} é também dada por (C.30). Para faltas envolvendo outras fases, basta utilizar em (C.30) as respectivas tensões e correntes das fases curto-circuitadas.

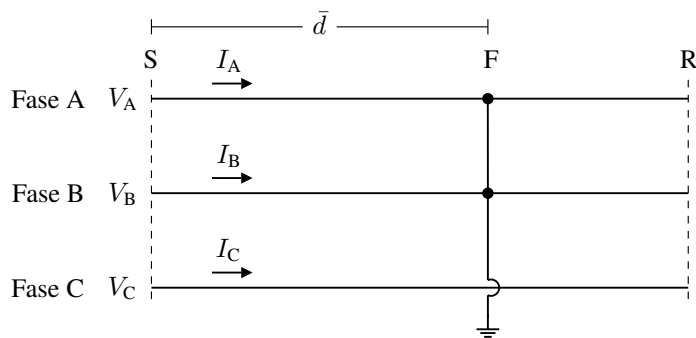


Figura C.4: Linha de transmissão transposta com falta sólida do tipo fase-fase-terra (fases A e B). Nesse caso, $V_{FA} = V_{FB} = 0$.

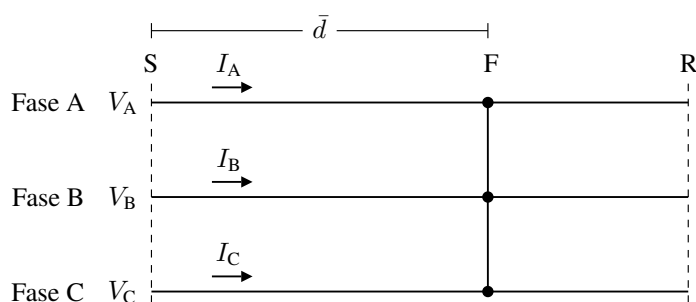


Figura C.5: Linha de transmissão transposta com falta sólida trifásica.

Faltas Trifásicas

Considere agora a Figura C.5, que ilustra a ocorrência de uma falta sólida trifásica no ponto F da LT. De maneira análoga ao caso de uma falta do tipo fase A-fase B, as tensões V_A e V_B são dadas por (C.26) e (C.27), respectivamente. Conseqüentemente, Z_{SF1} também é calculada através de (C.30). A diferença é que como nesse caso a falta envolve as três fases da linha, pode-se utilizar em (C.30) qualquer conjunto de tensão e corrente de linha: V_{AB} e I_{AB} ou V_{BC} e I_{BC} ou V_{CA} e I_{CA} .

Referências Bibliográficas

- [1] A. Volta, “On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 90, pp. 403–431, 1800.
- [2] A. P. Chagas, “Os 200 anos da pilha elétrica,” *Química Nova*, vol. 23, no. 3, pp. 427–429, maio/jun. 2000.
- [3] R. S. Kirby, S. Withington, A. B. Darling e F. G. Kilgour, *Engineering in History*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1956.
- [4] C. A. Gross, *Power System Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- [5] F. A. T. Furfari, “Westinghouse and the AC System - 1895–1895,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 8–11, set/out. 2002.
- [6] W. Stanley Jr., “Induction-Coil,” Patent 349.611, set., 1896.
- [7] J. E. Brittain, “Electrical engineering hall of fame - George Westinghouse,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 8, pp. 1347–1349, ago. 2004.
- [8] C. L. Sulzberger, “Triumph of ac - From Pearl Street to Niagara,” *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 64–67, maio/jun. 2003.
- [9] K. Jones, “George Westinghouse, Thomas Edison & the battle of the currents,” *Electrical Apparatus*, vol. 56, no. 10, out. 2003.
- [10] C. L. Sulzberger, “Triumph of ac, part 2 - the battle of the currents,” *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 70–73, jul./ago. 2003.
- [11] C. C. de Brasil Camargo, *Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Fundamentais*, 3rd ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.
- [12] L. A. Koscheev, “Environmental characteristics of HVDC overhead transmission lines,” in *Proc. Third Workshop on Power Grid Interconnection in Northeast Asia*, Vladivostok, set./out. 2003.

-
- [13] J. D. Glover e M. S. Sarma, *Power System Analysis and Design*, 3rd ed. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 2002.
- [14] W. D. Stevenson Jr., *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1978.
- [15] R. S. Nichols, “The first electric power transmission line in North America - Oregon City, Oregon,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 9, pp. 7–10, jul/ago. 2003.
- [16] N. Kagan, C. C. B. de Oliveira e E. J. Robba, *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- [17] T. W. Stringfield, D. J. Marihart e R. F. Stevens, “Fault location methods for overhead lines,” *Transactions of the AIEE, Part III, Power Apparatus and Systems*, vol. 76, pp. 518–530, ago. 1957.
- [18] E. Born e J. Jaeger, “Device locates point of fault on transmission lines,” *Electrical World*, vol. 168, pp. 133–134, jul. 1967.
- [19] A. Domijan, G. T. Heydt, A. P. S. Meliopoulos, S. S. Venkata e S. West, “Directions of research on electric power quality,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 429–436, jan. 1993.
- [20] J. Stones e A. Collinson, “Power quality,” *Power Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 58–64, abr. 2001.
- [21] “IEEE recommended practice for monitoring electric power quality,” New York, jun. 1995.
- [22] C. J. Melhorn e M. F. McGranaghan, “Interpretation and analysis of power quality measurements,” in *Proc. IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, Charlotte, North Carolina, maio 1995, pp. 1–9.
- [23] A. Hussain, M. H. Sukairi, A. Mohamed e R. Mohamed, “Automatic detection of power quality disturbances and identification of transient signals,” in *Proc. International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA)*, vol. 2, Kuala Lumpur, ago. 2001, pp. 462–465.
- [24] C. DeWinkel e J. D. Lamoree, “Storing power for critical loads,” *IEEE Spectrum*, vol. 30, no. 6, pp. 38–42, jun. 1993.
- [25] J. Arrillaga, M. H. J. Bollen e N. R. Watson, “Power quality following deregulation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 246–261, fev. 2000.

-
- [26] E. C. Penna, “Metodologia para avaliação do risco de desligamento de linhas de transmissão,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, dez. 2002.
- [27] A. L. Dalcastagnê, S. Noceti Filho, H. H. Zürn e R. Seara, “Método iterativo para localização de faltas em linhas de transmissão baseado em fasores não-sincronizados,” in *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2006)*, Salvador, out. 2006, pp. 2939–2944.
- [28] —, “A two-terminal fault location approach based on unsynchronized phasors,” in *Proc. 2006 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2006)*, Chongqing, out. 2006.
- [29] D. Novosel, D. G. Hart, E. Udren e J. Garitty, “Unsynchronized two-terminal fault location estimation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 130–138, jan. 1996.
- [30] “IEEE guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines,” New York, jun. 2005.
- [31] A. A. Girgis, D. G. Hart e W. L. Peterson, “A new fault location technique for two- and three-terminal lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 7, pp. 98–107, jan. 1992.
- [32] I. Zamora, J. F. Miñambres, A. J. Mazón, R. Alvarez-Isasi e J. Lazaro, “Fault location on two-terminal transmission lines based on voltages,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 1, pp. 1–6, jan. 1996.
- [33] P. Balcerek e J. Izykowski, “Improved unsynchronized two-end algorithm for locating faults in power transmission lines,” in *Proc. IEEE Bologna PowerTech Conference*, Bologna, jun. 2003.
- [34] O. I. Elgerd, *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1976.
- [35] D. V. Coury, “Apostila proteção em sistemas eletroenergéticos.”
- [36] Y. Tang, H. F. Wang, R. K. Aggarwal e A. T. Johns, “Fault indicators in transmission and distribution systems,” in *Proc. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000*, London, abr. 2000, pp. 238–243.
- [37] E. G. da Silveira e C. Pereira, “Localização de faltas permanentes em linhas de transmissão utilizando a impedância aparente vista de um de seus terminais,” in *Anais do*

-
- XIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2002)*, Natal, set. 2002, pp. 1675–1680.
- [38] A. V. Oppenheim e A. S. Willsky, *Signals & Systems*, 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [39] R. E. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, mar. 1960.
- [40] B. D. O. Anderson e J. B. Moore, *Optimal Filtering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1979.
- [41] O. Rioul e M. Vetterli, “Wavelets and signal processing,” *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 14–38, out. 1991.
- [42] D. V. Coury, M. Oleskovicz e R. Giovanini, *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. São Carlos: EESC-USP, 2007.
- [43] L. V. Fausett, *Applied Numerical Analysis Using Matlab*. Prentice Hall, 1999.
- [44] T. Gönen, *Electric Power Distribution System Engineering*. McGraw-Hill, Inc., 1986.
- [45] P. Järventausta, P. Verho e J. Partanen, “Using fuzzy sets to model the uncertainty in the fault location of distribution feeders,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 954–960, abr. 1994.
- [46] R. Das, M. S. Sachdev e T. S. Sidhu, “A fault locator for radial subtransmission and distribution lines,” in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, jul. 2000.
- [47] M. M. Saha, F. Provoost e E. Rosolowski, “Fault location method for MV cable network,” in *Proc. 7th IEE Annual Conference on Developments in Power System Protection*, Amsterdam, abr. 2001, pp. 323–326.
- [48] M. M. Saha, R. Das, P. Verho e D. Novosel, “Review of fault location techniques for distribution systems,” in *Proc. Power Systems and Communications Infrastructures for the Future*, Beijing, set. 2002.
- [49] *Alternative Transient Program, User Manual and Rule Guide*, 1989.
- [50] L. C. Zanetta Jr., *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*, 1st ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

-
- [51] D. G. Fink e H. W. Beaty, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 14th ed. McGraw-Hill Handbooks, 2000.
- [52] “IEEE guide for protective relay applications to transmission lines,” New York, fev. 2000.
- [53] A. T. Johns e S. Jamali, “Accurate fault location technique for power transmission lines,” *IEE Proceedings*, vol. 137, no. 6, pp. 395–402, nov. 1990.
- [54] D. E. Hedman, “Propagation on overhead transmission lines I - the theory of modal analysis,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 84, pp. 200–205, mar. 1965.
- [55] C. L. Fortescue, “Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks,” *Trans. AIEE*, vol. 37, pp. 1027–1140, 1918.
- [56] C. C. B. de Oliveira, H. P. Schmidt, N. Kagan e E. J. Robba, *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência Componentes Simétricas*, 2nd ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.
- [57] L. O. Barthold, N. D. Reppen e D. E. Hedman, *Análise de Circuitos de Sistemas de Potência*, 2nd ed. Edições UFSM, 1983, vol. 1.
- [58] E. Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems*. John Wiley & Sons, 1943, vol. 1.
- [59] L. M. Wedepohl, “Application of matrix methods to the solutions of travelling-wave phenomena in polyphase systems,” *Proceedings of IEE*, vol. 110, no. 12, pp. 2200–2212, dez. 1963.
- [60] H. W. Dommel e W. S. Meyer, “Computation of electromagnetic transients,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 7, pp. 983–993, jul. 1974.
- [61] M. C. Tavares, J. Pissolato Filho e C. M. Portela, “Quasi-modes multiphase transmission line model,” *Electric Power Systems Research*, vol. 49, no. 3, pp. 159–167, abr. 1999.
- [62] M. C. Tavares, J. Pissolato e C. M. Portela, “Quasi-modes three-phase transmission line model – comparison with existing frequency dependent models,” *Electric Power Systems Research*, vol. 56, no. 2, pp. 167–175, nov. 2000.
- [63] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura e T. Sakaguchi, “A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part I - Fourier transformation method,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1316–1322, mar. 1981.

-
- [64] ———, “A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part II - Laplace Transform method,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 101, no. 3, pp. 564–573, mar. 1982.
- [65] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow e T. Matsushima, “Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 101, no. 8, pp. 2892–2898, ago. 1982.
- [66] L. Eriksson, M. M. Saha e G. D. Rockefeller, “An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 2, pp. 424–436, fev. 1985.
- [67] R. L. Boylestad, *Introdução à Análise de Circuitos*, 10th ed. São Paulo: Prentice-Hall, 2004.
- [68] P. F. Gale, P. A. Crossley, X. Bingyin, G. Yaozhong, B. J. Cory e J. R. G. Barker, “Fault location based on travelling waves,” in *Proc. IEE Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, York, mar. 1993, pp. 54–59.
- [69] B. Widrow e M. A. Lehr, “30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 9, pp. 1415–1442, set. 1990.
- [70] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–352, 1965.
- [71] W. J. Ackerman e W. R. Block, “Understanding supervisory systems,” *Computer Applications in Power*, vol. 5, no. 4, pp. 37–40, out. 1992.
- [72] A. G. Bruce, “Reliability analysis of electric utility SCADA systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 844–849, ago. 1998.
- [73] Y. Sekine, Y. Akimoto, M. Kunugi, C. Fukui e S. Fukui, “Fault diagnosis of power systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 5, pp. 673–683, maio 1992.
- [74] Yuan-Yih Hsu, F. C. Lu, Y. Chien, J. P. Liu, J. T. Lin, H. S. Yu e R. T. Kuo, “An expert system for locating distribution system faults,” in *Proc. IEEE/PES 1990 Summer Meeting*, Minneapolis, jul. 1990, pp. 366–372.
- [75] D. Novosel, B. Bachmann, D. Hart, Y. Hu e M. M. Saha, “Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 4, pp. 1728–1736, out. 1996.

-
- [76] L. V. Bewley, *Traveling Waves on Transmission Lines*. Dover Publications, Inc., 1963.
- [77] J. Rohrig, "Location of faulty places by measuring with cathode ray oscillographs," *Elektrotech Zeits*, vol. 8, pp. 241–242, fev. 1931.
- [78] M. Sneddon e P. Gale, "Fault location on transmission lines," in *Proc. IEE Colloquium on Operational Monitoring of Distribution and Transmission Systems*, jan. 1997, pp. 2/1–2/3.
- [79] P. Crossley, M. Davidson e P. Gale, "Fault location using travelling waves," in *Proc. IEE Colloquium on Instrumentation in the Electrical Supply Industry*, jun. 1993, pp. 6/1–6/3.
- [80] P. M. da Silveira, "Identificação e localização de faltas utilizando análise por decomposição wavelet para relés de linhas de transmissão," Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, ago. 2001.
- [81] S. Rajendra e P. G. Maclaren, "Travelling waves techniques applied to the protection of teed circuits:- principle of travelling wave techniques," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 12, pp. 3544–3550, dez. 1985.
- [82] ———, "Travelling waves techniques applied to the protection of teed circuits:- multi-phase and multi-circuit system," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 12, pp. 3551–3557, dez. 1985.
- [83] M. Kezunović, B. Perunović e J. Mrkić, "An accurate fault location using synchronized sampling at two ends of a transmission line," in *Proc. Applications of Synchronized Phasors Conference*, Washington, DC, 1993.
- [84] M. Kezunović, J. Mrkić e B. Perunović, "An accurate fault location algorithm using synchronized sampling," *Electric Power Systems Research*, vol. 29, no. 3, pp. 161–169, maio 1994.
- [85] H. D. McInnes e I. F. Morrison, "Real time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computer," *IEA Electric Engineering Transactions*, pp. 16–23, mar. 1971.
- [86] A. M. Ranjbar e B. J. Cory, "An improved method for the digital protection of high voltage transmission lines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 2, pp. 544–550, mar./abr. 1975.

-
- [87] M. Akke e J. S. Thorp, "Some improvements in the three-phase differential equation algorithm for fast transmission line protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 66–72, jan. 1998.
- [88] P. F. Ribeiro, "Wavelet transform: an advanced tool for analyzing non-stationary harmonic distortion in power systems," in *Proc. 6th International Conference on Harmonics in Power Systems*, Bologna, set. 1994, pp. 365–369.
- [89] P. M. da Silveira, R. Seara e H. H. Zürn, "Localização de faltas por ondas viajantes – uma nova abordagem baseada em decomposição Wavelet," in *Anais do XVI SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia*, Campinas, out. 2001.
- [90] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the Wavelet representation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, jul. 1989.
- [91] D. W. P. Thomas, C. Christopoulos, Y. Tang, P. Gale e J. Stokoe, "Single ended travelling wave fault location scheme based on wavelet analysis," in *Proc. Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, Amsterdam, abr. 2004, pp. 196–199.
- [92] Q. Jian, C. Xiangwun e Z. Jianchao, "Travelling wave fault location of transmission line using Wavelet transform," in *Proc. International Conference on Power System Technology POWERCON 98*, vol. 1, Beijing, ago. 1998, pp. 533–537.
- [93] R. L. Burden e J. D. Faires, *Análise Numérica*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- [94] C. E. de Moraes Pereira e L. C. Zanetta Jr., "Análise comparativa de alguns algoritmos de localização digital de faltas em linhas de transmissão," *SBA Controle & Automação*, vol. 11, no. 3, pp. 135–140, set., out., nov., dezembro 2000.
- [95] M. Moreto, "Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- [96] A. T. Johns, S. Jamali e S. M. Haden, "New accurate transmission line fault location equipment," in *Proc. 4th International Conference on Developments in Power Protection*, abr. 1989, pp. 1–5.
- [97] Joe-Air Jiang, Jun-Zhe Yang, Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu e Jih-Chen Ma, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines - part

-
- I: theory and algorithms,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 486–493, abr. 2000.
- [98] Joe-Air Jiang, Ying-Hong Lin, Jun-Zhe Yang, Tong-Ming Too e Chih-Wen Liu, “An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines - part II: implementation and performance evaluation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1136–1146, out. 2000.
- [99] H. A. da Silva e J. Szczupak, “Localização precisa de falhas em linhas de transmissão sem uso da seqüência zero,” in *Anais do XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XV SNPTEE)*, Foz do Iguaçu, out. 1999, pp. 1–6.
- [100] A. L. Dalcastagnê, A. L. Bettiol e S. L. Zimath, “Análise de fontes de erros na localização de faltas em linhas de transmissão através de algoritmos de uma e duas extremidades,” in *Anais do XII Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ (XII ERIAC)*, Foz do Iguaçu, maio 2007, pp. 1–8.
- [101] T. J. Eastham, *Reactive Power Control in Electric Systems*. New York: Wiley-Interscience, 1982.
- [102] M. C. Tavares, J. Pissolato e C. M. Portela, “New mode-domain multiphase transmission line model – Clarke transformation evaluation,” in *Proc. International Conference on Power System Technology (POWERCON 98)*, vol. 2, Beijing, ago. 1998, pp. 860–864.
- [103] “Getting started with MATLAB,” Natick, MA, set. 2006.
- [104] D. J. Lawrence, L. Z. Cabeza e L. T. Hochberg, “Development of an advanced transmission line fault location system part II: algorithm development and simulation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 1972–1983, out. 1992.
- [105] P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*. New York: Wiley-Interscience, 1995.