

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO:  
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS ALGORITMOS E  
IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA  
APLICAÇÕES PRÁTICAS**

**EDUARDO GONZAGA DA SILVEIRA**

**BELO HORIZONTE**

**2007**

**Eduardo Gonzaga da Silveira**

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO:  
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS ALGORITMOS E  
IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA  
APLICAÇÕES PRÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Clever Pereira**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Escola de Engenharia da UFMG

Belo Horizonte  
2007

A Deus,  
a minha esposa, Simone, e a meus  
filhos, Melise e Gabriel.  
Amo vocês.

## **Agradecimentos**

Ao Professor Clever Pereira, pela orientação, amizade e incentivo.

À Simone, companheira de todas as horas, que sempre me incentivou a seguir em frente, compartilhando as alegrias e dificuldades, apoiando-me sempre que necessário.

À minha filha, Melise, que, em sua ingenuidade, ofereceu-me carinho, amor, sorrisos, inspirando-me e motivando-me, ao longo do curso de doutorado.

Ao meu filho, Gabriel, que foi, ainda no ventre de sua mãe, fonte de inspiração e encorajamento.

Aos colegas do Laboratório de Proteção Digital, do Centro de Pesquisa em Descargas Atmosféricas da UFMG, em especial aos amigos Sérgio de Souza Abreu, Rodrigo Valadão, Thiago Matozinhos e Rodrigo Bolda.

Aos professores, funcionários e amigos do CPDEE, que, estando ao meu lado nos momentos difíceis ou descontraídos, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Jésus e Alice, que, mesmo diante de grandes dificuldades e sacrifícios, ao longo da vida, proporcionaram-me a oportunidade de seguir os caminhos que me levaram a realização do curso de doutorado.

Aos familiares, pelo carinho e apoio.

Ao CEFET – MG, pelo incentivo à minha formação.

## Resumo

A localização de faltas em linhas de transmissão permite estimar o local de ocorrência de um curto-circuito, fazendo uso de amostras de tensão e corrente de um ou mais terminais. Desta forma, a equipe de manutenção pode chegar mais rapidamente ao local de defeito, restaurando as condições operacionais em um menor intervalo de tempo, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico e reduzindo os custos associados aos desligamentos.

Este trabalho apresenta um estudo sobre localização digital de faltas em linhas de transmissão, com dados de um e dois terminais, usando grandezas fasoriais. Os objetivos são o estudo dos principais algoritmos já estabelecidos na literatura e o desenvolvimento de novos, bem como a implementação destes algoritmos em um sistema computacional destinado a aplicações práticas.

Inicialmente, é realizado um estudo dos modelos de linhas de transmissão, considerando os domínios de fases e modal. Em seguida, é feita uma revisão bibliográfica sobre localização de faltas, abordando os principais artigos sobre o tema. São também enfatizadas as rotinas de pré-processamento dos dados de entrada para os algoritmos, necessárias para a sua correta aplicação, de forma a obter resultados compatíveis com aplicações de campo.

É feita uma avaliação do desempenho dos algoritmos descritos na literatura, quando submetidos a fatores práticos que podem influenciar os seus resultados, tais como a utilização do modo terrestre e as aplicações em linhas de transmissão não balanceadas. O objetivo deste estudo é permitir a verificação da influência destes fatores nos resultados finais dos algoritmos e validar suas aplicações de uma forma compatível com o desejado em casos práticos, ou seja, resultados mais confiáveis e erros cada vez menores.

Segue a apresentação dos novos algoritmos propostos, descrevendo-se seus modelos matemáticos e apresentando os resultados das suas aplicações em casos simulados e reais de curto-circuito.

Finalmente, são apresentadas as conclusões e propostas de continuidade do trabalho realizado.

## **Abstract**

On transmission line automatic fault location allows to estimate the approximate point at the line where the short-circuit occurs, using voltage and current data from one or more of its ends. The maintenance team can reach the fault local and restore the operational conditions fast and more efficiently, increasing the reliability of the power electric system and reducing the associated costs.

This work presents a study about transmission line automatic fault location, with data from one or two sides, using phasor quantities. The objectives are the study of the main algorithms described in the technical literature and the proposal and development of new practical algorithms, and the implementation of these algorithms in a computational system for field applications.

Initially a study of transmission line models is presented, in phase and modal domains. Then, a bibliographic review is made, using the main papers related to the theme transmission line fault location. Pre-processing routines of the input data are emphasized in order to establish the necessary actions that have to be made on these input signals that lead to good final results when the location algorithms are applied in real data.

The performance of some well known location algorithms is analyzed when submitted to several practical factors that can affect their results, like the employment of ground mode quantities and non balanced transmission lines faults. The objective is to analyze the influence of these factors on the final location results and to validate their application in accordance with practical cases, that is, more reliable results and smaller errors.

The proposed new algorithms are then described, introducing their models and presenting the results of their applications on simulated and real transmission line fault cases.

Finally the conclusions and the suggestions for future works are presented.

## SUMÁRIO

<b>Lista de Siglas e Abreviaturas</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>17</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1 – Localização de Faltas em Linhas de Transmissão.....	18
1.2 – Estrutura Básica de um Localizador Digital de Faltas.....	20
1.3 – Objetivos.....	22
1.4 – Organização do Texto.....	22
<b>2 – MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>	<b>24</b>
2.1 – Parâmetros da Linha de Transmissão.....	24
2.2 – Linha de Transmissão Monofásica.....	27
2.2.1 – Representação da Linha como Quadripolo.....	27
2.2.2 – Modelo $\pi$ Equivalente.....	28
2.2.3 – Modelo $\pi$ Nominal.....	31
2.2.4 – Modelo Impedância Nominal Série.....	32
2.3 – Linha de Transmissão Trifásica – Domínio de Fases.....	33
2.3.1 - Modelo $\pi$ Equivalente.....	35

2.3.2 - Modelo $\pi$ Nominal.....	36
2.3.3 - Modelo Impedância Série.....	37
2.4 - O Domínio Modal e a Diagonalização de Matrizes.....	37
2.4.1 - Modos da Linha de Transmissão.....	38
2.4.2 – Matrizes de Impedâncias e Admitâncias Modais.....	41
2.4.3 - Relação entre as matrizes $[T_V]$ e $[T_I]$ .....	42
2.4.4 - Relação entre as matrizes $[\gamma_m]$ , $[Z_m]$ e $[Y_m]$ .....	43
2.5 – Linha de Transmissão Trifásica – Domínio Modal.....	44
2.5.1 – Modelo $\pi$ Equivalente.....	45
2.5.2 – Modelo $\pi$ Nominal.....	45
2.5.3 – Modelo Impedância Série.....	45
<b>3 – TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>	<b>46</b>
3.1 – Algoritmos que Utilizam Dados de Dois terminais.....	49
3.2 – Algoritmos que Utilizam Dados de Um Terminal.....	59
<b>4 – PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA</b>	<b>75</b>
4.1 – Introdução.....	75
4.2 – Entrada dos Dados de Tensão e Corrente.....	76
4.3 – Filtragem Passa-Baixa.....	78
4.4 – Interpolação dos Dados Filtrados.....	79
4.5 – Estimação dos Fasores Fundamentais.....	80
4.6 – Detecção do Instante da Falta.....	85

4.7 – Sincronização dos Dados.....	88
4.8 – Identificação da Falta.....	89
<b>5 – FONTES DE ERROS EM LOCALIZAÇÃO DE FALTAS</b>	<b>92</b>
5.1 – A Influência do Solo.....	93
5.2 – A Influência da Transposição.....	96
5.2.1 – Algoritmo de dois terminais.....	97
5.2.1.1 – Linha de 138 kV e 200 km – Algoritmo de Johns.....	99
5.2.1.2 – Linha de 345 kV e 400 km – Algoritmo de Johns.....	101
5.2.2 – Algoritmo de um terminal.....	104
5.2.2.1 – Linha de 138 kV e 200 km – Algoritmo de Takagi.....	104
5.2.2.2 – Linha de 345 kV e 400 km – Algoritmo de Takagi.....	106
5.3 – A Influência dos Transformadores de Corrente e Potencial.....	107
5.4 – A Influência da Sincronização de Dados.....	109
5.5 – A Influência da Detecção da Falta.....	110
5.6 – A Influência da Resistência de Falta.....	111
5.7 – Aplicação em Casos Reais de Curto-Circuito.....	115
5.7.1 – Algoritmo de Johns.....	115
5.7.2 – Algoritmo de Takagi.....	117
<b>6 – PROPOSTAS DE MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS</b>	<b>120</b>
6.1 – Estimação das Impedâncias das Fontes Equivalentes.....	121
6.1.1 - Cálculo das Impedâncias das Fontes.....	122

6.2 – Método de Localização Aplicando Otimização – OtimLoc.....	130
6.2.1 – Modelo de Linha Curta.....	130
6.2.2 – Modelo de Linha Longa.....	136
6.3 – Método de Localização Para Linhas de Dois Terminais com Dados não Sincronizados – LocMod.....	139
6.3.1 – Modelo de Linha Curta.....	139
6.3.2 – Modelo de Linha Longa.....	148
6.3.3 – Modelo de Linha Longa – Domínio de Fases.....	156
6.4 – Método de Dois Terminais Para Linhas Paralelas Não Transpostas.....	157
<b>7 – O PROGRAMA SISLOC - T</b>	<b>163</b>
7.1 – Interface de Dados.....	163
7.1.1 – Seleção do Algoritmo.....	164
7.1.2 – Entrada de Dados.....	165
7.1.3 – Seleção dos Fasores e Identificação da Falta.....	166
7.1.4 – Verificação dos Parâmetros.....	166
7.2 – Interface de Localização.....	167
7.2.1 – A Localização da Falta.....	167
7.3 – Guia de Utilização.....	168
7.4 – Configurações Mínimas.....	171
<b>8 – CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE</b>	<b>173</b>
8.1 – Propostas de Continuidade do Trabalho.....	178

<b>ANEXO – DADOS DAS LINHAS E FONTES</b>	<b>180</b>
A.1 – Geometria das Linhas.....	180
A.1.1 – Linha de 138 kV.....	180
A.1.2 – Linha de 345 kV.....	181
A.2 – Parâmetros das Linhas.....	181
A.3 – Dados das Fontes.....	182
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>183</b>

## Lista de Siglas e Abreviaturas

A/D	circuitos de amostragem, conversão
TP	transformador de potencial
TC	transformador de corrente
GPS	sistema de posicionamento global
LT	linha de transmissão
SE	subestação
NPC	número de pontos por ciclo
SIR	módulo da razão entre as impedâncias da fonte local e remota
RDP	registrador digital de perturbação
EMTP	<i>Eletromagnetic Transients Program</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
PSCAD	<i>Power Systems Computer Aided Design</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
PROTLab	Laboratório de Proteção Digital
LRC	<i>Lightning Research Center</i>
GOPAC	Grupo de Otimização e Projeto Assistido por Computador

## Lista de Símbolos

$V_F$	tensão no ponto de falta
$I_F$	corrente no ponto de falta
$V_S$	tensão pós-falta no terminal S
$I_S$	corrente de falta no terminal S
$V'_S$	tensão pré-falta no terminal S
$I'_S$	corrente pré-falta no terminal S
$V''_S$	tensão no ponto S para o circuito superposto
$I''_S$	corrente no ponto S para o circuito superposto
$I''_{FS}$	corrente no ponto F do circuito superposto que flui para o terminal S
$V_R$	tensão pós-falta no terminal R
$I_R$	corrente pós-falta no terminal R
$V'_R$	tensão pré-falta no terminal R
$I'_R$	corrente pré-falta no terminal R
$V''_R$	tensão no terminal R para o superposto
$I''_R$	corrente no terminal R para o circuito superposto
$I''_{FR}$	corrente no ponto F do circuito superposto que flui para o terminal R
$E_S$	tensão da fonte local
$E_R$	tensão da fonte remota

$Z_{SS}$	impedância da fonte local
$Z_{RR}$	impedância da fonte remota
$Z_{SF}$	impedância da linha de transmissão do terminal S ao ponto de falta
$Z_{RF}$	impedância da linha de transmissão do terminal R ao ponto de falta
$R_F$	resistência de falta
$Z_S$	impedância medida do terminal S ao ponto de falta
$Z_n$	impedância longitudinal total da linha
$Y_n$	admitância transversal total da linha
$Z$	impedância longitudinal unitária da linha
$R$	resistência longitudinal unitária da linha
$L$	indutância longitudinal unitária da linha
$G$	condutância transversal unitária da linha
$C$	capacitância transversal unitária da linha
$[V_S]$	vetor de tensões no terminal S
$[V_R]$	vetor de tensões no terminal R
$[I_S]$	vetor de correntes no terminal S
$[I_R]$	vetor de correntes no terminal R
$[Z]$	matriz de impedâncias série da linha
$[Y]$	matriz de admitâncias da linha
$[Z_C]$	matriz de impedâncias características da linha
$[\gamma_V]$	matriz de constantes de propagação da linha não transposta para cálculo das tensões
$[\gamma_I]$	matriz de constantes de propagação da linha não transposta para cálculo das correntes

$[Z_n]$	matriz de impedâncias série total da linha
$[T]$	matriz de autovetores de uma matriz quadrada
$[V_m]$	vetor das tensões modais da linha
$[I_m]$	vetor das correntes modais da linha
$[\gamma_m]$	matriz das constantes de propagações modais da linha
$[Z_m]$	matriz das impedâncias modais da linha
$[Y_m]$	matriz das admitâncias modais da linha
$[I]$	matriz identidade
$x$	distância para a falta
$\ell$	extensão da linha de transmissão
$A, B, C, D$	constantes generalizadas do quadripolo representativo da linha
$\gamma$	constante de propagação da linha
$Z_C$	impedância característica da linha
$Y_C$	admitância característica da linha
$k_t(x)$	fator de distribuição de corrente para o algoritmo de Takagi
$k_w(x)$	fator de distribuição de corrente para o algoritmo de Wiszniewski
$m$	fator de compensação de seqüência zero
$f_0$	freqüência fundamental
$\omega_0$	freqüência angular fundamental
$f_a$	freqüência de amostragem
$\tilde{X}$	vetor de regressores
$\bar{\theta}$	vetor de coeficientes
$\bar{Y}$	vetor de amostras conhecidas

$M_k$	valor do monitor de transitórios no instante k
$\delta$	defasagem angular entre os terminais
(1), (2), (3)	índices modais
AT	falta fase-A-Terra
BT	falta fase-B-Terra
CT	falta fase-C-Terra
AB	falta fase-A-fase-B
BC	falta fase-B-fase-C
CA	falta fase-C-fase-A
ABT	falta fase-A-fase-B-Terra
BCT	falta fase-B-fase-C-Terra
CAT	falta fase-C-fase-A-Terra

## Lista de Figuras

1.1 – Localizador de faltas de um terminal.....	21
1.2 – Localizador de faltas de dois terminais.....	21
2.1 – Variação da resistência longitudinal com a frequência.....	25
2.2 – Variação da indutância longitudinal com a frequência.....	26
2.3 – Variação da capacitância transversal com a frequência.....	26
2.4 – Circuito equivalente de uma LT na forma de um quadripolo.....	27
2.5 – Modelo $\pi$ equivalente.....	29
2.6 – Equivalente $\pi$ nominal.....	32
2.7 – Equivalente impedância série.....	32
2.8 – Representação do circuito $\pi$ de uma linha trifásica.....	33
2.9 – Geometria da linha e forma das matrizes de parâmetros.....	34
2.10 – Transposição de uma linha.....	37
3.1(a) – Circuito pré-falta.....	46
3.1(b) – Circuito pré-falta com a fonte $V_F$ e a resistência $R_F$ .....	47
3.1(c) – Circuito em falta.....	47
3.1(d) – Circuito em falta com duas fontes em oposição.....	48
3.1(e) – Circuito superposto ou puro de falta.....	48
3.2 – Diagrama de impedâncias.....	59
3.3 – Diagrama fasorial.....	59
3.4 – Circuito em falta com $Z_E$ .....	65
3.5 – Circuito superposto.....	70
4.1 – Algoritmo de localização de faltas.....	77
4.2 - Resposta em frequência para um filtro de Butterworth de ordem 2.....	78
4.3 – Ondas de tensões de entrada e filtradas para um curto-circuito AT.....	79

4.4 – Ondas de corrente original e a obtida por interpolação.....	80
4.5 – Resposta em frequência do filtro dos erros mínimos quadrados.....	83
4.6 – Ondas de tensão e corrente de uma falta real após aplicação do filtro passa-baixa.....	84
4.7 – Amplitude e fase dos fasores estimados a partir das ondas de tensão da Fig. 4.6.....	84
4.8 – Amplitude e fase dos fasores estimados a partir das ondas de corrente da Fig. 4.6.....	85
4.9 – Janelas de dados.....	86
4.10 – Ondas de corrente amostrada e estimada.....	87
4.11 – Monitor de transitórios para o exemplo da Fig. 4.10.....	88
4.12 – Unidades do monitor de transitórios resultantes de uma falta AT para identificação.....	90
5.1 – Variação das indutâncias próprias e mútuas com a resistividade.....	94
5.2 – Variação das indutâncias de seqüência positiva e zero com a resistividade.....	94
5.3 – Erros em função da variação da resistividade do solo – Algoritmo de Johns.....	95
5.4 – Erros em função da variação da resistividade do solo – Algoritmo de Takagi.....	96
5.5 – Esquema de transposição de uma LT trifásica.....	96
5.6 – Perfil da amplitude dos fasores de tensão na linha não transposta de 138 kV e 90 km....	97
5.7 – Perfil da fase dos fasores de tensão na linha não transposta de 138 kV e 90 km.....	98
5.8 – Perfil da amplitude dos fasores de tensão na linha não transposta de 345 kV e 400 km..	98
5.9 – Perfil da fase dos fasores de tensão na linha não transposta de 345 kV e 400 km.....	99
5.10(a) - Linha perf. transposta – Falta AT.....	100
5.10(b) - Linha não transposta – Falta AT.....	100
5.10(c) - Linha perf. transposta – Falta BC.....	100
5.10(d) - Linha não transposta – Falta BC.....	100
5.10(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC.....	100
5.10(f) - Linha não transposta – Falta ABC.....	100
5.11 – Linha de 400 km com transposições.....	101
5.12(a) - Linha perf. transposta – Falta AT.....	101

5.12(b) - Linha com transposições – Falta AT.....	101
5.12(c) - Linha perf. transposta – Falta BC.....	101
5.12(d) - Linha com transposições – Falta BC.....	101
5.12(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC.....	102
5.12(f) - Linha com transposições – Falta ABC.....	102
5.13(a) - Linha com transposições – $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ .....	103
5.13(b) - Linha com transposições – $\rho = 500 \Omega\text{m}$ .....	103
5.13(c) - Linha com transposições – $\rho = 100 \Omega\text{m}$ .....	103
5.13(d) - Linha com transposições – $\rho = 5000 \Omega\text{m}$ .....	103
5.14 – Erros médios percentuais para linha com transposições.....	104
5.15(a) - Linha perf. transposta – Falta AT.....	105
5.15(b) - Linha não transposta – Falta AT.....	105
5.15(c) - Linha perf. transposta – Falta BC.....	105
5.15(d) - Linha não transposta – Falta BC.....	105
5.15(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC.....	105
5.15(f) - Linha não transposta – Falta ABC.....	105
5.16(a) - Linha perf. transposta – Falta AT.....	106
5.16(b) - Linha com transposições – Falta AT.....	106
5.16(c) - Linha perf. transposta – Falta BC.....	106
5.16(d) - Linha com transposições – Falta BC.....	106
5.16(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC.....	107
5.16(f) - Linha com transposições – Falta ABC.....	107
5.17(a) – Caso 1 – Tabela 5.2.....	108
5.17(b) – Caso 2 – Tabela 5.2.....	108
5.17(c) – Caso 3 – Tabela 5.2.....	108
5.17(d) – Caso 4 – Tabela 5.2.....	108

5.18(a) – Erros de sincronização – 5 graus.....	109
5.18(b) – Erros de sincronização – 10 graus.....	109
5.18(c) – Erros de sincronização – 15 graus.....	109
5.18(d) – Erros de sincronização – 20 graus.....	109
5.19(a) – Detecção de uma falta AT real no terminal local.....	110
5.19 (b) – Detecção de uma falta AT real no terminal remoto.....	111
5.20 – Influência da capacidade de curto-circuito das fontes no fator de distribuição de corrente.....	113
5.21 – Erros devido à resistência de falta.....	114
5.22 – Erros percentuais – casos reais – Algoritmo de Johns.....	116
5.23 – Erros percentuais – casos reais – Algoritmo de Takagi.....	118
6.1 – Linha de transmissão com subsistemas equivalentes.....	122
6.2 – Equivalente de um sistema elétrico a partir das barras S e R.....	122
6.3(a) – Circuito pré-falta.....	124
6.3(b) – Circuito em falta.....	124
6.3(c) – Circuito superposto.....	124
6.4 – Evolução da resistência estimada - Fonte da linha de 345 kV.....	125
6.5 – Evolução da reatância estimada - Fonte da linha de 345 kV.....	125
6.6 – Evolução da resistência estimada - Fonte da linha de 138 kV.....	126
6.7 – Evolução da reatância estimada - Fonte da linha de 138 kV.....	126
6.8 – Erros de localização para faltas AT, $SIR = 1$ e $R_F = 20$ ohms.....	127
6.9 – Erros de localização para faltas AT, $SIR = 1$ e $R_F = 100$ ohms.....	127
6.10 – Erros de localização para faltas AT, $SIR = 10$ e $R_F = 20$ ohms.....	128
6.11 – Erros de localização para faltas AT, $SIR = 10$ e $R_F = 100$ ohms.....	128
6.12 – Linha de transmissão em falta.....	130
6.13 – Circuito para uma falta AT.....	131

6.14 – Função objetivo para uma falta AT.....	133
6.15 – Evolução do objetivo.....	133
6.16 – Evolução das variáveis distância e resistência de falta.....	133
6.17 - Erros de localização - OtimLoc – Modelo de linha curta.....	134
6.18 – Resistência de falta estimada durante um curto-circuito.....	135
6.19 – Resistência de falta estimada em um caso real.....	136
6.20 – Erros de localização - OtimLoc – Modelo de linha longa.....	137
6.21 – Linha Monofásica.....	139
6.22 – Erros de localização – Dados Sincronizados - Linha de 138 KV – Falta AT.....	142
6.23 – Erros de localização– Dados Não Sincronizados - Defasagem de 45 graus - Linha de 138 KV – Falta AT.....	142
6.24 – Erros de localização – Dados Não Sincronizados - Defasagem de 90 graus - Linha de 138 KV – Falta AT.....	143
6.25 – Erros de localização – Dados Sincronizados - Linha de 138 KV - Falta BC.....	144
6.26 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Linha de 138 KV - Falta ABC.....	144
6.27 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Falta AT – Linha de 345 KV.....	145
6.28 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Falta BC – Linha de 345 KV.....	145
6.29 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Falta ABC – Linha de 345 KV.....	146
6.30 – Evolução das estimativas para uma falta AT a 120 km do terminal local.....	149
6.31 – Erros de localização para faltas AT com $R_F = 20$ ohms – Linha de 138 KV.....	150
6.32 – Erros de localização para faltas AT com $R_F = 100$ ohms – Linha de 138 KV.....	150
6.33 – Erros de localização para faltas AT e fase dos fasores remotos deslocada de 45 graus Linha de 138 KV.....	151
6.34 – Erros de localização para faltas BC – Linha de 138 KV.....	152
6.35 – Erros de localização para faltas ABC – Linha de 138 KV.....	152
6.36 – Erros de localização para faltas AT – Linha de 345 KV.....	153
6.37 – Erros de localização para faltas BC – Linha de 345 KV.....	153
6.38 – Erros de localização para faltas ABC – Linha de 345 KV.....	154

6.39 – Configurações de linhas com circuitos em paralelo.....	157
6.40 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 100 km perfeitamente transposta.....	158
6.41 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 200 km perfeitamente transposta.....	159
6.42 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 100 km não transposta Matrizes $[Z]$ e $[Y]$ para a linha perfeitamente transposta.....	160
6.43 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 200 km não transposta Matrizes $[Z]$ e $[Y]$ para a linha perfeitamente transposta.....	160
6.44 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 100 km não transposta Matrizes $[Z]$ e $[Y]$ para a linha não transposta.....	161
6.45 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 200 km não transposta Matrizes $[Z]$ e $[Y]$ para a linha não transposta.....	162
7.1 – Arquitetura visão controle.....	163
7.2 – Formulário do módulo de pré-localização.....	164
7.3 – Seleção do método de localização.....	165
7.4 – Formulário com os parâmetros da linha.....	166
7.5 – Formulário do módulo de localização.....	167
7.6 – Estimativa do local de falta.....	168
7.7 – Leitura de dados.....	169
7.8 – Seleção dos canais analógicos.....	169
7.9 – Seleção dos canais digitais.....	169
7.10 – Inserção dos marcadores e seleção do tipo de falta.....	171
A.1 – Geometria da linha de 138 kV.....	180
A.2 – Geometria da linha de 345 kV.....	181

## Lista de Tabelas

4.1 – Identificação da falta.....	91
5.1 – Erro médio percentual nas localizações para variações na resistividade e altura dos condutores - linha de 400 km.....	104
5.2 – Variações na amplitude e na fase dos fasores de entrada do algoritmo de localização.....	108
5.3 – Erros de localização em função da detecção da falta.....	111
5.4 – Erros de localização em função da resistência de falta.....	114
5.5 – Localização de faltas reais – Algoritmo de Johns.....	116
5.6 – Localização de faltas reais – Erros Percentuais – Algoritmo de Johns.....	117
5.7 – Localização de faltas reais – Algoritmo de Takagi.....	118
5.8 – Localização de faltas reais – Erros Percentuais – Algoritmo de Takagi.....	119
6.1 – Impedâncias das fontes para faltas reais.....	129
6.2 – Localização para casos reais de faltas – Algoritmo de Wiszniewski.....	129
6.3 - Casos reais – OtimLoc – Modelo de linha curta.....	135
6.4 - Casos reais – OtimLoc – Modelo de linha longa.....	138
6.5 – Erros Percentuais - Casos reais – OtimLoc.....	138
6.6 – Localização de faltas reais – LocMod (linha curta).....	147
6.7 – Erro percentual para localização de faltas reais - LocMod (linha curta).....	147
6.8 – Localização de faltas reais – LocMod (linha longa).....	155
6.9 – Erro percentual para localização de faltas reais - LocMod (linha longa).....	155
6.10 – Localização de faltas reais – LocMod no domínio de fases.....	156
A.1 – Parâmetros das linhas utilizadas nas faltas simuladas.....	181
A.2 – Dados das fontes utilizadas nas faltas simuladas.....	182

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 – Localização de Falhas em Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão aéreas constituem importantes componentes de um sistema elétrico. Possuem grande extensão, estando sujeitas a intempéries, como descargas atmosféricas, tempestades, ventos fortes, poluição e altas insolações, que podem provocar os mais diversos tipos de falhas, tirando-as de seu funcionamento normal, havendo, inclusive, a possibilidade da falência do sistema elétrico.

Na ocorrência de uma falha, é de interesse das empresas concessionárias dispor de uma sistemática que permita isolar, com rapidez e precisão, a parte do sistema elétrico que está com defeito e garantir seu pronto restabelecimento, de forma a atender à demanda de carga existente. Isto implica na redução de custos e dos riscos de colapso no sistema elétrico de potência, maior confiabilidade e a satisfação do consumidor com a qualidade do serviço prestado.

Quando há um curto-circuito em uma linha de transmissão, cabe aos relés de proteção a sua detecção, identificação e sinalização, comandando os disjuntores de forma a retirar de serviço a linha em falta. É tarefa então da concessionária, mais especificamente das suas divisões relacionadas à manutenção, a execução dos trabalhos de reparo, de forma a garantir que a linha possa ser reintegrada ao sistema elétrico, no menor tempo possível e com níveis de confiabilidade adequados. Para atingir estes objetivos, é importante que a equipe de manutenção tenha uma informação confiável do possível local de defeito.

A indicação da distância de falta por relés de proteção, normalmente uma função auxiliar nesses equipamentos, não é adequada para fins de reparo, por conter algoritmos simples, não havendo métodos para compensar os principais fatores que provocam erros de estimativa. Desta forma, é interessante um processamento de dados, através de localizadores de falhas que contêm algoritmos mais elaborados, não sujeitos à limitação de tempo imposta aos relés, capazes de fornecer melhores resultados. Com a adição de novas técnicas aos algoritmos, é possível a procura contínua da melhoria de precisão desses

localizadores, de forma a torná-los mais eficientes. Em caso de faltas temporárias, onde não há interrupção no funcionamento da linha, podem os localizadores atuar preventivamente, identificando possíveis pontos fracos e evitando futuras faltas permanentes.

Na localização de faltas em linhas de transmissão, vários fatores podem contribuir para provocar erros na indicação do local, dentre os quais se pode citar:

- A resistência de falta, que não é conhecida. Nos casos de faltas entre fases, as resistências são pequenas, em geral menores que  $0,5 \Omega$ . Em faltas envolvendo a terra, estas podem ter valores maiores que  $10 \Omega$  [1]. Em alguns casos, podem se tornar muito elevadas, como em árvores encostadas em cabos (da ordem de  $50 \Omega$  a  $100 \Omega$  [2]), condutores caídos em terrenos de elevada resistividade ou mesmo em queimadas (da ordem de  $15 \Omega$  a  $40 \Omega$  [2]).
- Corrente de contribuição para a falta do terminal remoto da linha, fator ainda mais agravante se esta vier do lado da fonte de menor impedância de curto-circuito.
- Presença de linhas paralelas ou próximas.
- Não simetria da linha.
- Presença de compensação série.
- Correntes e tensões pós-falta não puramente senoidais.
- Incorreções nos parâmetros de linha.
- Fluxo de carga pré-falta.

Os algoritmos de localização de falta podem ser classificados em duas categorias:

- Métodos baseados em medições de fasores em regime permanente;
- Métodos baseados em ondas viajantes.

Estas duas categorias podem ser divididas em dois grupos:

- Métodos que utilizam dados de um terminal da linha;
- Métodos que utilizam dados de mais de um terminal da linha.

No presente trabalho, desenvolvem-se estudos relacionados com localizadores para linhas de dois terminais que utilizam estimação de fasores na frequência fundamental para determinar a distância até o ponto de falta, tendo como motivação a busca de novos algoritmos mais precisos ou melhorias em algoritmos existentes, de forma a reduzir os erros.

Os algoritmos de dois terminais são normalmente mais precisos. Com dados de ambas as extremidades, é possível reduzir as simplificações e incertezas e ter uma resposta mais satisfatória, em relação à utilização de dados de apenas um terminal, reduzindo o efeito da resistência de falta e *infeed* remoto, na estimação da distância. Além disso, neste caso, não há necessidade de se conhecerem os equivalentes terminais das fontes. Contudo, sob o ponto de vista prático, esses localizadores podem trazer algumas desvantagens, principalmente associadas à necessidade de sincronização dos dados, no tempo.

Os localizadores que utilizam dados de um terminal têm a vantagem de não necessitar de valores medidos de tensão e corrente do lado remoto, que não se encontram sempre disponíveis. Entretanto são mais susceptíveis a erros, principalmente devido à resistência de falta, em virtude de simplificações no equacionamento dos algoritmos [3, 4, 5, 6, 7].

## 1.2 – Estrutura Básica de Um Localizador Digital de Faltas

Com o advento da tecnologia digital, muitas facilidades foram incorporadas ao serviço de proteção elétrica, tornando disponíveis dados de tensão e corrente, nos períodos pré e pós-falta, que puderam ser utilizados, entre outras aplicações, nos localizadores de faltas. Em relação à construção, os localizadores podem ser agrupados em dois tipos:

- Um equipamento que tem a função específica de localização, com um *hardware* semelhante a um relé digital, contendo filtros analógicos, circuitos de amostragem, conversão A/D e meios de gravação de arquivos;
- Um *software* desenvolvido para fins de localização de faltas, que contém rotinas para pré-processamento de dados, estimação de fasores e um ou mais algoritmos de localização. Neste caso, é usual a utilização de recursos já disponíveis no sistema elétrico, como oscilografias de relés e de registradores digitais de perturbações (RDP).

O processamento e a análise final para determinação do local de defeito e repasse da informação às equipes de manutenção são feitos, de forma geral, remotamente, pelos engenheiros de proteção. Por ser um procedimento *off-line*, é possível utilizar recursos avançados nos *softwares*, comparações com sistemas de localização de tempestades e até programas de curto-circuito, de forma a chegar o mais perto possível do local de defeito.

Apresenta-se, nas FIG. 1.1 e 1.2, a estrutura básica de um sistema de localização de faltas, com a utilização de dados de um e dois terminais.

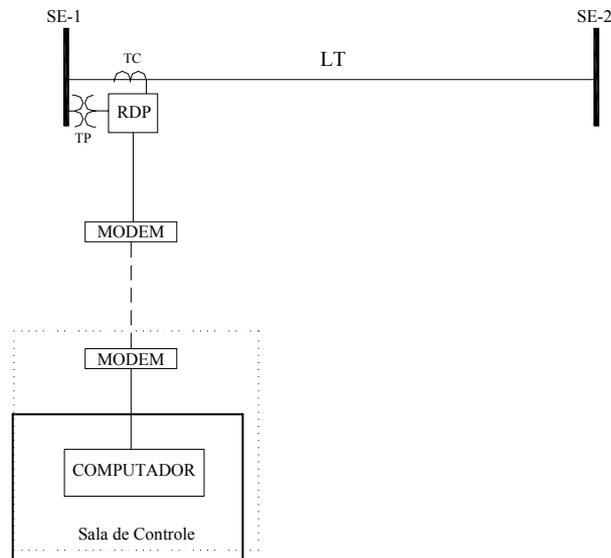


FIGURA 1.1 - Localizador de faltas de um terminal

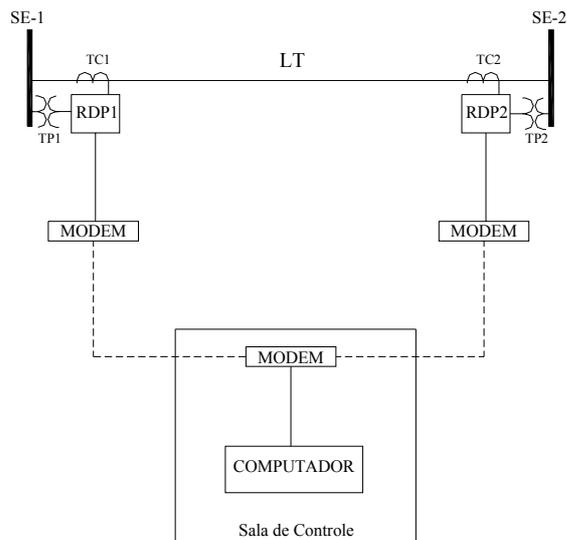


FIGURA 1.2 - Localizador de faltas de dois terminais

A amostragem dos dados é feita por um registrador digital de perturbações ou por um relé de proteção, junto aos transformadores de potencial (TP) e corrente (TC) das subestações, e transmitida à sala de controle via MODEM, onde o processamento para localização da falta é feito *off-line*, em um computador. No caso do localizador de dois terminais, para amostragem dos dados sincronizados no tempo, deve haver um canal de

comunicação entre os registradores ou a utilização do sistema de posicionamento global de satélites (GPS).

### **1.3 – Objetivos**

O tema localização de faltas, que vem sendo extensamente estudado na literatura, tem caráter prático. Este trabalho tem como objetivo principal apresentar estudos de técnicas de localização automática de faltas em linhas de transmissão, implementando ou adequando algoritmos existentes e propondo novos, aplicando-os em casos simulados e em sistemas elétricos reais, de forma a avaliar os resultados, buscando a minimização dos erros.

Uma revisão bibliográfica do assunto foi realizada, de forma a verificar como se encontra o estado da arte. As versões dos algoritmos desenvolvidos e das rotinas de pré-localização, necessárias para um pré-processamento nos dados de entrada, foram descritas e implementadas, através do *software* científico MATLAB e também na linguagem de programação C++, que deu origem a um aplicativo, com interfaces que facilitam a tarefa de localização de faltas.

Para avaliar o desempenho dos algoritmos, foram aplicados arquivos de faltas obtidos do PSCAD – Power Systems Computer Aided Design [8] e ATP – Alternative Transient Program [9], programas que permitem a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas. Assim, faltas com diferentes características foram simuladas, com variação da distância de ocorrência, do tipo, da resistência de falta, geometria, extensão e transposição da linha e da capacidade de curto-circuito das fontes. Além das simulações, resultados das localizações em casos reais de curto-circuito, provenientes do sistema elétrico brasileiro, foram apresentados.

### **1.4 – Organização do Texto**

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos. O presente capítulo apresenta uma introdução geral, onde é descrita a importância da localização da falta, os tipos de localizadores, bem como o objetivo do trabalho.

No capítulo 2, apresentam-se os modelos de linhas de transmissão, base sobre a qual se desenvolvem os métodos de localização de faltas.

No capítulo 3, é feita uma revisão bibliográfica das técnicas de localização de faltas com dados de um e dois terminais e métodos baseados em ondas viajantes e fasores, com algumas das referências mais importantes sobre o assunto.

No capítulo 4, são descritas as rotinas de processamentos dos dados de entrada utilizadas neste trabalho, que são: pré-condicionamento dos sinais de entrada (filtragem e interpolação), estimação dos fasores, determinação do instante da falta, sincronização dos dados e identificação da falta.

No capítulo 5, são estudadas algumas fontes de erros no processo de localização de faltas.

No capítulo 6, são propostos métodos de localização de faltas e os resultados obtidos dos algoritmos para faltas simuladas e reais.

No capítulo 7, apresenta-se uma descrição do programa de localização de faltas desenvolvido.

No capítulo 8, têm-se as principais conclusões do trabalho e as propostas de desenvolvimentos futuros.

No texto, também é apresentado um anexo, onde são mostradas as características das linhas e fontes utilizadas para obtenção dos dados simulados.

# 2

## MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os métodos de localização de faltas, baseados em grandezas fasoriais associadas à frequência fundamental, têm, nos modelos da linha de transmissão, um dos fatores que influenciam sua precisão. Estes modelos podem ser mais completos ou simplificados, em função da forma de abordar aspectos, como a capacitância transversal e a transposição.

As linhas de transmissão polifásicas podem ser modeladas nos domínios dos modos naturais de propagação e de fases. No domínio modal, faz-se uso da técnica de transformação modal, onde, através do cálculo de autovalores e autovetores das matrizes que caracterizam a linha, as  $n$  fases podem ser desacopladas em  $n$  linhas monofásicas independentes, simplificando a determinação do comportamento da linha. No domínio das fases, a idéia principal é realizar a análise de forma direta, evitando a transição para o domínio modal.

### 2.1 – Parâmetros da Linha de Transmissão

A determinação dos parâmetros de uma linha de transmissão, por depender de diversos fatores, é relativamente difícil. O solo não é plano e homogêneo e, em geral, suas características não são conhecidas com precisão; a configuração geométrica exata da linha é relativamente complexa para efeitos de definição dos campos eletromagnéticos correspondentes, levando em conta a diversidade das flechas dos condutores, das formas das torres e das cadeias de isoladores.

Em condutores reais, os campos eletromagnéticos têm profundidade de penetração que varia com a frequência. A terra conduzirá uma corrente tão mais superficial quanto maior a frequência. Para as muito altas, a terra se comportará praticamente como um condutor perfeito, que só permite a passagem de corrente alternada em sua superfície [10].

No solo real, há uma separação entre as imagens elétricas - que não mudam em relação ao solo ideal - e as imagens magnéticas, cuja profundidade variará com a frequência. Assim, o cálculo das capacitâncias não muda, enquanto que o das indutâncias

sofrerá modificações significativas. A impedância tem o seu valor alterado devido ao efeito pelicular [10].

Muitos pesquisadores dedicaram-se ao problema de penetração de campos magnéticos em solos reais e sua conseqüente influência nos parâmetros das linhas, destacando-se os métodos desenvolvidos por J. R. Carson [11] e por Deri [12].

Nas FIG. 2.1, 2.2 e 2.3, mostra-se a variação com a freqüência da resistência e indutância longitudinais unitárias e da capacitância transversal unitária, de seqüência positiva (modo aéreo) e zero (modo terrestre)<sup>1</sup> para uma linha de transmissão de 345 kV, que tem suas características descritas no anexo.

A condutância transversal é normalmente negligenciada em estudos de linhas de transmissão típicas, por ser uma pequena componente da admitância, exceto se houver acentuada perda por efeito corona [13].

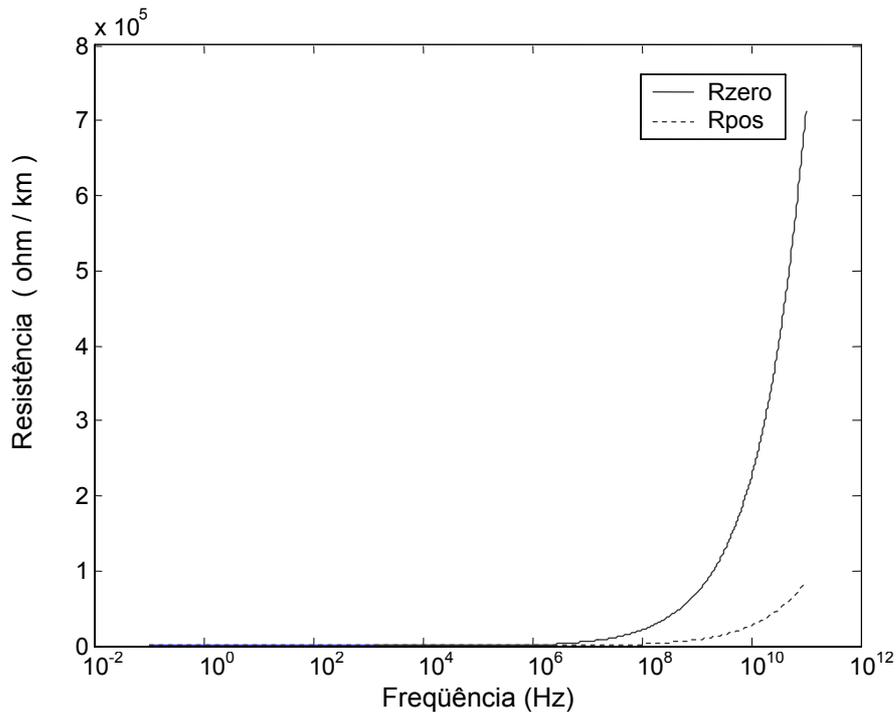


FIGURA 2.1 – Variação da resistência longitudinal com a freqüência

<sup>1</sup> Considerar grandezas de seqüência zero, positiva e negativa, para a linha perfeitamente transposta e com transposições, e grandezas de modo 0, 1 e 2, para a linha não transposta.

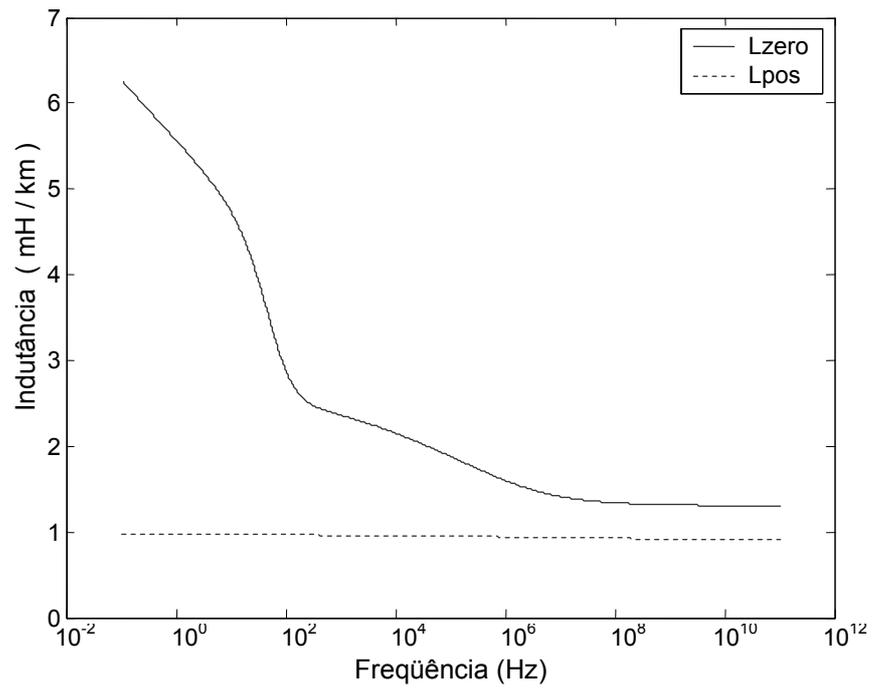


FIGURA 2.2 – Variação da indutância longitudinal com a frequência

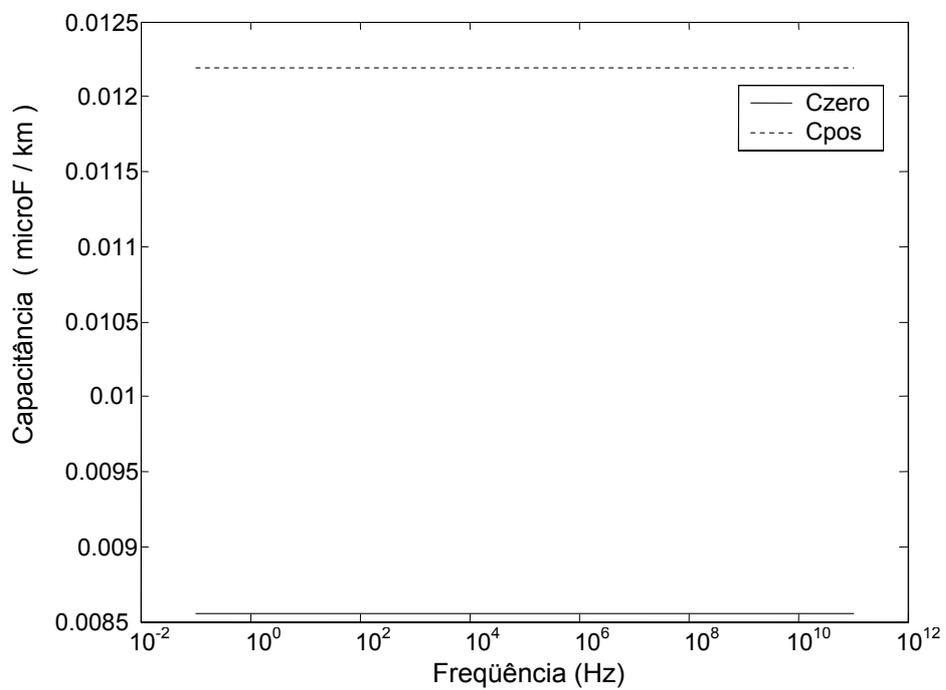


FIGURA 2.3 – Variação da capacitância transversal com a frequência

Observando-se as figuras, verifica-se uma maior variação nos modos de seqüência zero da resistência e indutância. A indutância de seqüência positiva mantém-se praticamente inalterada ao longo do espectro de frequências.

A seguir, são apresentados modelos de linha de transmissão em regime permanente nos domínios de fases e modal [13, 14, 15].

## 2.2 – Linha de Transmissão Monofásica

### 2.2.1 – Representação da Linha como Quadripolo

Na FIG. 2.4, tem-se o circuito da LT (linha de transmissão) na forma de um quadripolo.

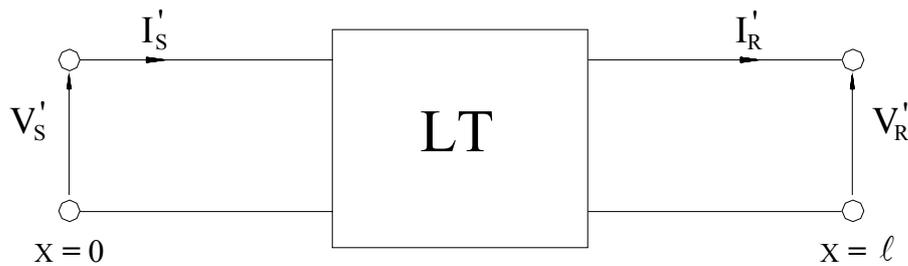


FIGURA 2.4 – Circuito equivalente de uma LT na forma de um quadripolo

Das equações de onda da linha de transmissão, a tensão e a corrente em qualquer ponto da linha são dadas por

$$\begin{aligned} V(x) &= \cosh(\gamma x)V'_S - Z_C \sinh(\gamma x)I'_S \\ I(x) &= -Y_C \sinh(\gamma x)V'_S + \cosh(\gamma x)I'_S \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde  $V'_S$  e  $I'_S$  são, respectivamente, a tensão e a corrente na barra emissora S;  $Z_C$ , a impedância característica, e  $\gamma$ , a constante de propagação, dadas por

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.2)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad (2.3)$$

sendo  $R$  e  $L$  a resistência e indutância longitudinais unitárias,  $G$  e  $C$  a condutância e a capacitância transversais unitárias.

Na forma matricial, a equação (2.1) pode ser escrita como

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_C \sinh(\gamma x) \\ -Y_C \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_S \\ I'_S \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Considerando  $x = \ell$ , tem-se para a tensão e a corrente na barra receptora

$$\begin{aligned} V(x = \ell) &= V'_R \\ I(x = \ell) &= I'_R \end{aligned} \quad (2.5)$$

Assim, pode-se escrever

$$\begin{bmatrix} V'_R \\ I'_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \ell) & -Z_C \sinh(\gamma \ell) \\ -Y_C \sinh(\gamma \ell) & \cosh(\gamma \ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_S \\ I'_S \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Resolvendo as equações para  $V'_S$  e  $I'_S$ , resulta o modelo ABCD de linhas de transmissão.

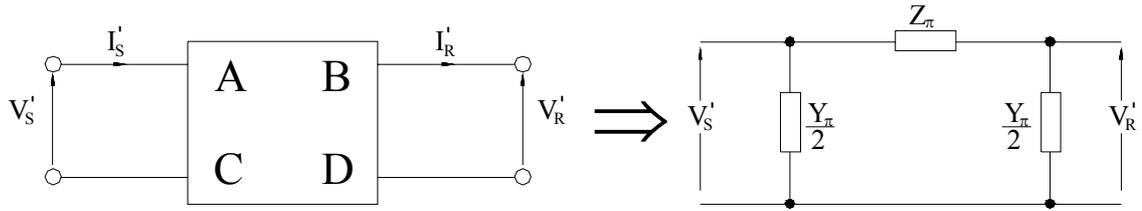
$$\begin{bmatrix} V'_S \\ I'_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_R \\ I'_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \ell) & Z_C \sinh(\gamma \ell) \\ Y_C \sinh(\gamma \ell) & \cosh(\gamma \ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_R \\ I'_R \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dessa forma

$$\begin{aligned} A &= D = \cosh(\gamma \ell) \\ B &= Z_C \sinh(\gamma \ell) \\ C &= Y_C \sinh(\gamma \ell) \end{aligned} \quad (2.8)$$

### 2.2.2 – Modelo $\pi$ Equivalente

É possível fazer a correspondência entre o modelo ABCD da FIG. 2.4 e o modelo  $\pi$  do quadripolo associado a uma linha de transmissão, conforme FIG. 2.5.


 FIGURA 2.5 – Modelo  $\pi$  equivalente

Para o circuito da FIG. 2.5, tem-se

$$\begin{aligned} V'_S &= AV'_R + BI'_R \\ I'_S &= CV'_R + DI'_R \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$V'_S = V'_R + Z_\pi \left( I'_R + \frac{Y_\pi}{2} V'_R \right) \quad (2.10)$$

$$I'_S - \frac{Y_\pi}{2} V'_S = I'_R + \frac{Y_\pi}{2} V'_R \quad (2.11)$$

ou seja,

$$\begin{aligned} V'_S &= \left( 1 + Z_\pi \frac{Y_\pi}{2} \right) V'_R + Z_\pi I'_R \\ I'_S &= \left( Y_\pi + \frac{Y_\pi}{2} Z_\pi \frac{Y_\pi}{2} \right) V'_R + \left( 1 + Z_\pi \frac{Y_\pi}{2} \right) I'_R \end{aligned} \quad (2.12)$$

Comparando a equação (2.12) com a equação (2.9), tem-se

$$\begin{aligned} 1 + Z_\pi \frac{Y_\pi}{2} &= A = \cosh(\gamma \ell) \\ Z_\pi &= B = Z_c \sinh(\gamma \ell) \\ Y_\pi + \frac{Y_\pi}{2} Z_\pi \frac{Y_\pi}{2} &= C = Y_c \sinh(\gamma \ell) \\ 1 + Z_\pi \frac{Y_\pi}{2} &= D = \cosh(\gamma \ell) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Definindo a impedância nominal da LT como

$$Z_n = Z\ell \quad (2.14)$$

tem-se

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{Z^2}{ZY}} = \frac{Z}{\gamma} = \frac{Z\ell}{\gamma\ell} = \frac{Z_n}{\gamma\ell} \quad (2.15)$$

e

$$Z_\pi = B = Z_C \sinh(\gamma\ell) = Z_n \frac{\sinh(\gamma\ell)}{(\gamma\ell)} \quad (2.16)$$

Resolvendo a primeira das equações em (2.13) para  $\frac{Y_\pi}{2}$

$$\begin{aligned} 1 + Z_n \frac{Y_\pi}{2} &= \cosh(\gamma\ell) \\ 1 + B \frac{Y_\pi}{2} &= A \\ \frac{Y_\pi}{2} &= \frac{A-1}{B} \end{aligned} \quad (2.17)$$

ou ainda

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{\cosh(\gamma\ell) - 1}{Z_C \sinh(\gamma\ell)} = Y_C \frac{\cosh(\gamma\ell) - 1}{\sinh(\gamma\ell)} \quad (2.18)$$

como

$$\operatorname{tgh}\left(\frac{\gamma\ell}{2}\right) = \frac{\cosh(\gamma\ell) - 1}{\sinh(\gamma\ell)} \quad (2.19)$$

e substituindo (2.19) em (2.18)

$$\frac{Y_\pi}{2} = Y_C \operatorname{tgh}\left(\frac{\gamma\ell}{2}\right) \quad (2.20)$$

Definindo a admitância nominal da LT como

$$Y_n = Y \ell \quad (2.21)$$

tem-se

$$Y_C = \sqrt{\frac{Y}{Z}} = \frac{Y}{\sqrt{ZY}} = \frac{Y}{\gamma} = \frac{Y \frac{\ell}{2}}{\gamma \frac{\ell}{2}} = \frac{Y_n / 2}{\gamma \ell / 2} \quad (2.22)$$

assim

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{A-1}{B} = Y_C \frac{\cosh(\gamma \ell) - 1}{\sinh(\gamma \ell)} = Y_C \operatorname{tgh}(\gamma \ell / 2) = \frac{Y_n}{2} \frac{\operatorname{tgh}(\gamma \ell / 2)}{\gamma \ell / 2} \quad (2.23)$$

O modelo é indicado para linhas longas, com extensão acima de 240 km.

### 2.2.3 – Modelo $\pi$ Nominal

Para derivação do modelo  $\pi$  nominal, considerem-se os seguintes limites:

$$\lim_{\gamma \ell \rightarrow 0} \frac{\sinh(\gamma \ell)}{\gamma \ell} = \lim_{\gamma \ell \rightarrow 0} \cosh(\gamma \ell) = 1 \quad (2.24)$$

$$\lim_{\gamma \ell \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tgh}(\gamma \ell / 2)}{(\gamma \ell / 2)} = \lim_{\gamma \ell \rightarrow 0} \left[ \frac{\sinh(\gamma \ell / 2)}{(\gamma \ell / 2)} \frac{1}{\cosh(\gamma \ell / 2)} \right] = 1 \quad (2.25)$$

Logo, para valores muito pequenos de  $\gamma \ell$ , tem-se

$$Z_\pi \rightarrow Z_n \quad e \quad \frac{Y_\pi}{2} \rightarrow \frac{Y_n}{2} \quad (2.26)$$

As constantes A, B, C e D da linha são

$$\begin{aligned}
 A &= D = 1 + \frac{Z_n Y_n}{2} \\
 B &= Z_n \\
 C &= Y_n \left( 1 + \frac{Z_n Y_n}{4} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

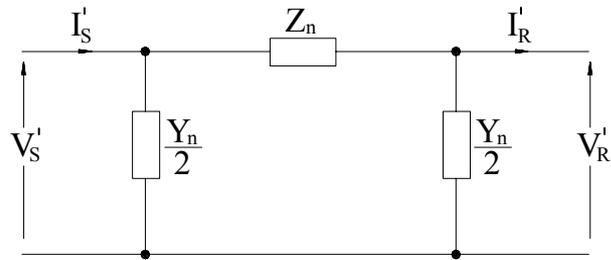


FIGURA 2.6 – Equivalente  $\pi$  nominal

O modelo não considera as correções hiperbólicas, sendo indicado para linhas médias, com extensão de 80 a 240 km.

### 2.2.4 – Modelo Impedância Nominal Série

Neste modelo, despreza-se a capacitância, além das correções hiperbólicas, sendo indicado para linhas curtas, com extensão de até 80 km.

As constantes A, B, C e D da linha são

$$\begin{aligned}
 A &= D = 1 \\
 B &= Z_n \\
 C &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

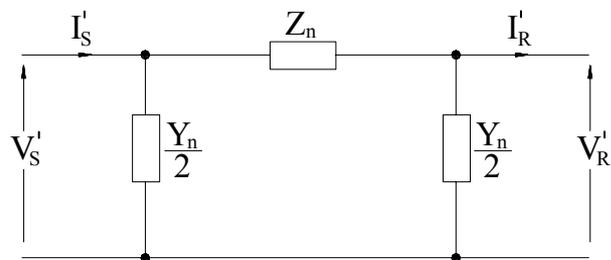


FIGURA 2.7 – Equivalente impedância série

### 2.3 – Linha de Transmissão Trifásica – Domínio de Fases

O cálculo de parâmetros da linha fornece as matrizes unitárias  $[Z]$  e  $[Y]$ , com os elementos dados por unidade de comprimento, que, no caso de circuito simples, são de ordem 3 na forma [15, 16]

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Na FIG. 2.8, mostra-se a representação trifásica do modelo  $\pi$  de uma linha de transmissão.

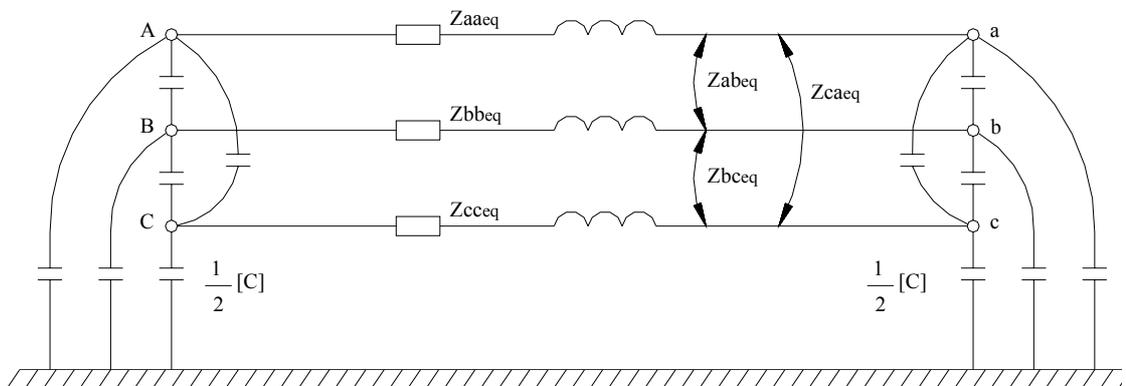


FIGURA 2.8 – Representação do circuito  $\pi$  de uma linha trifásica

Em uma linha não transposta, e considerando o efeito do solo, a forma de (2.29) e (2.30) depende da geometria da linha, como pode ser visto em alguns casos mostrados na FIG. 2.9.

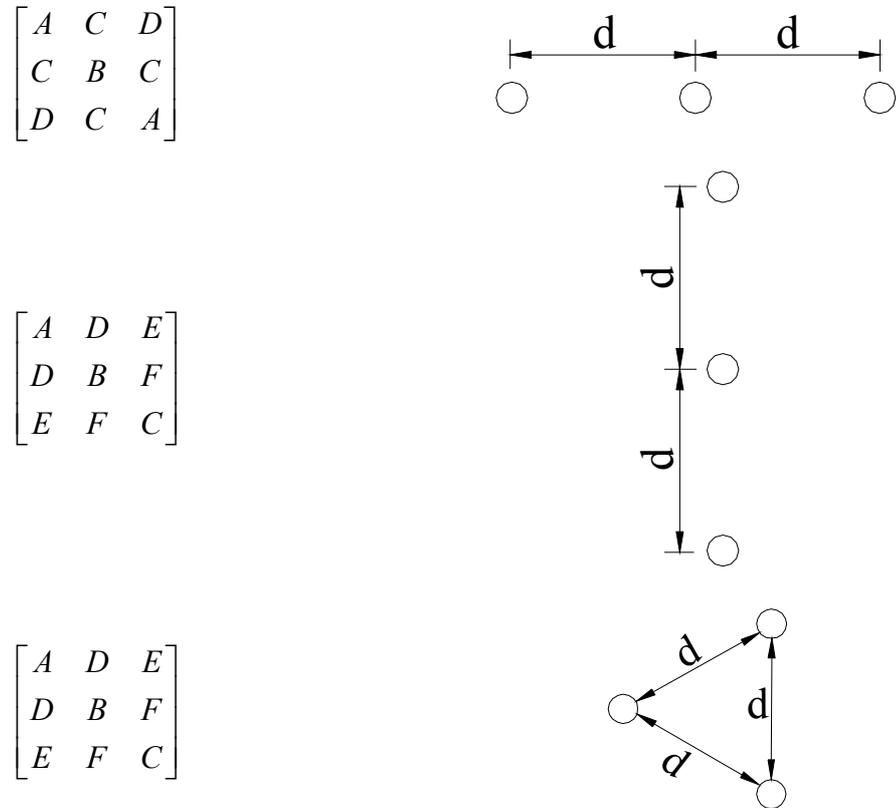


FIGURA 2.9 – Geometria da linha e forma das matrizes de parâmetros

Considerando a linha perfeitamente transposta, obtêm-se, para qualquer ponto da linha, as matrizes equilibradas da forma indicada nas equações (2.31) e (2.32), ou seja, os elementos da diagonal iguais entre si, o mesmo ocorrendo com os elementos fora da diagonal.

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_p & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_p & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_p \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

A expressão da linha para as constantes trifásicas é da forma

$$\begin{bmatrix} [V_S] \\ [I_S] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_R] \\ [I_R] \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

onde

$$[V_S] = \begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix}$$

$$[I_S] = \begin{bmatrix} I_{SA} \\ I_{SB} \\ I_{SC} \end{bmatrix}$$

$$[V_R] = \begin{bmatrix} V_{RA} \\ V_{RB} \\ V_{RC} \end{bmatrix}$$

$$[I_R] = \begin{bmatrix} I_{RA} \\ I_{RB} \\ I_{RC} \end{bmatrix}$$

e  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$ ,  $[D]$  são matrizes de ordem 3.

### 2.3.1 – Modelo $\pi$ Equivalente

Na determinação das constantes trifásicas, utilizam-se as matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  da linha. As matrizes trifásicas de impedância característica e constante de propagação são dadas por

$$\begin{aligned} [Z_c] &= [Y]^{-1} \sqrt{[Y][Z]} \\ [\gamma_v] &= \sqrt{[Z][Y]} \\ [\gamma_I] &= \sqrt{[Y][Z]} \end{aligned} \quad (2.34)$$

As constantes trifásicas  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  e  $[D]$  são

$$\begin{aligned}
 [A] &= \cosh([\gamma_V]\ell) \\
 [B] &= [Z_C] \sinh([\gamma_I]\ell) \\
 [C] &= [Z_C]^{-1} \sinh([\gamma_V]\ell) \\
 [D] &= \cosh([\gamma_I]\ell)
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

A matriz de impedância série total da linha de transmissão é

$$[Z_n] = B \tag{2.36}$$

As matrizes de admitâncias no início e fim da linha são

$$\begin{aligned}
 [Y_{iS}] &= [B]^{-1} ([D] - [I]) \\
 [Y_{iR}] &= [B]^{-1} ([A] - [I])
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

onde  $[I]$  é a matriz identidade. Considerando a linha perfeitamente transposta, as matrizes das constantes de propagação  $[\gamma_V]$  e  $[\gamma_I]$  são iguais.

### 2.3.2 – Modelo $\pi$ Nominal

As constantes trifásicas da linha são

$$\begin{aligned}
 [A] &= [I] + \frac{[Z_n][Y_n]}{2} \\
 [B] &= [Z_n] \\
 [C] &= [Y_n] \left( [I] + \frac{[Z_n][Y_n]}{4} \right) \\
 [D] &= [I] + \frac{[Y_n][Z_n]}{2}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

onde

$[Z_n] = [Z]\ell$  é a matriz de impedâncias série da linha de transmissão e

$[Y_n] = [Y]\frac{\ell}{2}$  é a matriz de admitâncias total dividida no início e fim da linha.

Em uma linha perfeitamente transposta,  $[Z][Y] = [Y][Z]$ , ou seja,  $[A] = [D]$ .

### 2.3.3 – Modelo Impedância Série

Neste modelo, a matriz de admitâncias é nula. Têm-se para as constantes trifásicas

$$\begin{aligned} [A] &= [D] = [I] \\ [B] &= [Z_n] \\ [C] &= [0] \end{aligned} \tag{2.39}$$

## 2.4 - O Domínio Modal e a Diagonalização de Matrizes

Uma importante técnica no estudo de sistemas polifásicos consiste em desacoplar as fases, através de um processo de diagonalização, mudando o estudo do domínio de fases para o domínio dos modos. Duas matrizes de transformação são necessárias: a matriz  $[T_I]$  para as correntes ( $[I_{fase}] = [T_I][I_{modo}]$ ) e a matriz  $[T_V]$  para as tensões ( $[V_{fase}] = [T_V][V_{modo}]$ ).

Há uma classe de configuração de condutores, chamada de sistema balanceado [16], em que o processo de diagonalização é bastante simplificado, as matrizes  $[T_V]$  e  $[T_I]$  são iguais e uma única matriz produz o desacoplamento para toda faixa de frequências. Uma linha de transmissão balanceada fornece matrizes de parâmetros  $[Z]$  e  $[Y]$  da forma das equações (2.31) e (2.32). Uma linha trifásica de circuito simples torna-se balanceada, se é transposta, como na FIG. 2.10, em um dos esquemas mais utilizados e se a extensão das seções de transposição for muito menor que o comprimento de onda da frequência envolvida no estudo particular [17].

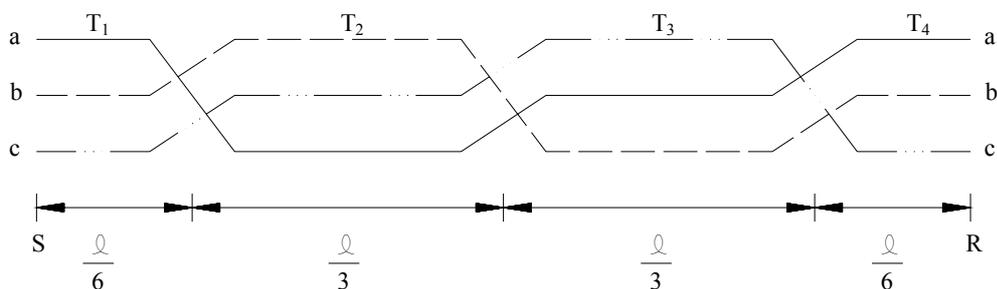


FIGURA 2.10 – Transposição de uma linha

As linhas balanceadas têm a propriedade útil de fazer com que as transformações para desacoplar a equação diferencial sejam independentes do sistema particular. Há

muitas transformações conhecidas para linhas balanceadas, entre as quais a de componentes simétricas, Clarke e Karrembauer.

Linhas não balanceadas são relativamente comuns como, por exemplo, linhas não transpostas ou trechos de transposição que não podem ser considerados eletromagneticamente pequenos. Nestes casos,  $[Z]$  e  $[Y]$  são matrizes simétricas, o que não acontece com os produtos  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$ . As matrizes de transformação são dependentes da frequência, e os modos são definidos somente para frequência na qual a matriz de transformação é calculada.

As equações diferenciais de segunda ordem, que descrevem uma linha de transmissão polifásica, possuem difícil solução, devido ao acoplamento entre as fases. Desacoplando as fases, um sistema polifásico de  $n$  fases pode ser transformado em  $n$  sistemas monofásicos [10, 18, 19], que são matematicamente idênticos ao sistema original. Para um sistema polifásico genérico, existem diversos conjuntos de autovetores do produto matricial  $[Z][Y]$  que desacoplam as fases da linha [20].

As matrizes de transformação  $[T_I]$  e  $[T_V]$  são matrizes de autovetores associados aos produtos  $[Y][Z]$  e  $[Z][Y]$ , respectivamente, sendo, de maneira geral, complexas e com os elementos dependentes da frequência.

### 2.4.1 - Modos da Linha de Transmissão

As equações diferenciais para uma linha de transmissão com  $n$  fases, no domínio da frequência são

$$\frac{d[V]}{dx} = -[Z][I] \quad (2.40)$$

$$\frac{d[I]}{dx} = -[Y][V] \quad (2.41)$$

$$\frac{d^2[V]}{dx^2} = [Z][Y][V] \quad (2.42)$$

$$\frac{d^2[I]}{dx^2} = [Y][Z][I] \quad (2.43)$$

onde os vetores  $[V]$  e  $[I]$  são as tensões e correntes de fase, respectivamente. Os produtos  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$ , que, de forma geral, são distintos e não diagonais, podem ser transformados em matrizes diagonais, a partir de uma transformação de similaridade. Neste caso, os produtos matriciais  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$  resultarão em matrizes diagonais cujos elementos são os autovalores dos produtos matriciais [10, 18, 19].

A matriz  $[\gamma_v]$  dos autovalores de  $[Z][Y]$  é calculada através da seguinte relação

$$[\gamma_v] = [T_v]^{-1} [Z][Y][T_v] \quad (2.44)$$

A matriz  $[\gamma_i]$  dos autovalores do produto matricial  $[Y][Z]$  é dada por

$$[\gamma_i] = [T_i]^{-1} [Y][Z][T_i] \quad (2.45)$$

As colunas das matrizes  $[T_v]$  e  $[T_i]$  são os autovetores de  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$ , respectivamente, de forma geral distintos. Embora sendo os produtos  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$  diferentes, seus autovalores  $[\gamma_v]$  e  $[\gamma_i]$  são iguais, ou seja,

$$[\gamma_v] = [\gamma_i] \quad (2.46)$$

Denominando os autovalores dos produtos  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$  de  $[\gamma_m]$  obtém-se

$$[\gamma_m] = [\gamma_v] \quad (2.47)$$

$$[\gamma_m] = [\gamma_i] \quad (2.48)$$

Substituindo as equações (2.47) e (2.48) nas equações (2.44) e (2.45), tem-se como resultado

$$[\gamma_m] = [T_v]^{-1} [Z][Y][T_v] \quad (2.49)$$

$$[\gamma_m] = [T_i]^{-1} [Y][Z][T_i] \quad (2.50)$$

Fazendo a pré-multiplicação das equações (2.49) e (2.50) por  $[T_v]$  e  $[T_i]$  obtém-se

$$[T_v][\gamma_m] = [Z][Y][T_v] \quad (2.51)$$

$$[T_l][\gamma_m] = [Y][Z][T_l] \quad (2.52)$$

Fazendo a pós-multiplicação das equações (2.51) e (2.52) por  $[T_v]^{-1}$  e  $[T_l]^{-1}$ , respectivamente, obtém-se

$$[Z][Y] = [T_v][\gamma_m][T_v]^{-1} \quad (2.53)$$

$$[Y][Z] = [T_l][\gamma_m][T_l]^{-1} \quad (2.54)$$

Substituindo as equações (2.53) e (2.54) nas equações (2.42) e (2.43), respectivamente, chega-se a

$$\frac{d^2[V]}{dx^2} = [T_v][\gamma_m][T_v]^{-1}[V] \quad (2.55)$$

$$\frac{d^2[I]}{dx^2} = [T_l][\gamma_m][T_l]^{-1}[I] \quad (2.56)$$

Pré-multiplicando as equações (2.55) e (2.56) por  $[T_v]^{-1}$  e  $[T_l]^{-1}$ , respectivamente, obtém-se

$$\frac{d^2[T_v]^{-1}[V]}{dx^2} = [\gamma_m][T_v]^{-1}[V] \quad (2.57)$$

$$\frac{d^2[T_l]^{-1}[I]}{dx^2} = [\gamma_m][T_l]^{-1}[I] \quad (2.58)$$

Nas equações (2.57) e (2.58), pode-se definir as correntes e tensões modais como sendo

$$[V_m] = [T_v]^{-1}[V] \quad (2.59)$$

$$[I_m] = [T_l]^{-1}[I] \quad (2.60)$$

Manipulando as equações (2.59) e (2.60), obtém-se

$$[V] = [T_v][V_m] \quad (2.61)$$

$$[I] = [T_I][I_m] \quad (2.62)$$

onde  $[V_m]$  e  $[I_m]$  são os vetores com as tensões e as correntes modais da linha, respectivamente. Substituindo  $[V]$  e  $[I]$  das equações (2.61) e (2.62) nas equações (2.57) e (2.58), respectivamente, obtém-se

$$\frac{d^2[V_m]}{dx^2} = \gamma_m [V_m] \quad (2.63)$$

$$\frac{d^2[I_m]}{dx^2} = \gamma_m [I_m] \quad (2.64)$$

As expressões (2.63) e (2.64) são equações diferenciais dos modos exatos da linha. Devido ao fato de  $[\gamma_m]$  ser uma matriz diagonal, pode-se afirmar que a linha de  $n$  fases foi decomposta em  $n$  modos.

#### 2.4.2 – Matrizes de Impedâncias e Admitâncias Modais

Substituindo os vetores  $[V]$  e  $[I]$  das equações (2.61) e (2.62) nas equações (2.40) e (2.41), tem-se

$$\frac{d[T_v][V_m]}{dx} = -[Z][T_I][I_m] \quad (2.65)$$

$$\frac{d[T_I][I_m]}{dx} = -[Y][T_v][V_m] \quad (2.66)$$

Pré-multiplicando as equações (2.65) e (2.66) por  $[T_v]^{-1}$  e  $[T_I]^{-1}$ , respectivamente, obtém-se

$$\frac{d[V_m]}{dx} = -[T_v]^{-1}[Z][T_I][I_m] \quad (2.67)$$

$$\frac{d[I_m]}{dx} = -[T_I]^{-1}[Y][T_v][V_m] \quad (2.68)$$

As equações (2.67) e (2.68) podem ser escritas como sendo

$$\frac{d[V_m]}{dx} = -[Z_m][I_m] \quad (2.69)$$

$$\frac{d[I_m]}{dx} = -[Y_m][V_m] \quad (2.70)$$

Nas equações (2.69) e (2.70),  $[Z_m]$  e  $[Y_m]$  são, respectivamente, as matrizes de impedâncias longitudinais e de admitâncias transversais modais da linha. Estas matrizes, que são diagonais, são escritas como

$$[Z_m] = [T_v]^{-1}[Z][T_I] \quad (2.71)$$

$$[Y_m] = [T_I]^{-1}[Y][T_v] \quad (2.72)$$

### 2.4.3 - Relação entre as Matrizes $[T_v]$ e $[T_I]$

Considerando que a impedância mútua entre as fases  $i$  e  $j$  é idêntica à impedância mútua entre as fases  $j$  e  $i$ , pode-se afirmar que

$$[Z] = [Z]^T \quad (2.73)$$

$$[Y] = [Y]^T \quad (2.74)$$

Substituindo (2.73) e (2.74), na equação (2.49), obtém-se

$$[\gamma_m] = [T_v]^{-1}[Z]^T[Y]^T[T_v] \quad (2.75)$$

Sendo  $[Z]^T[Y]^T = ([Y][Z])^T$ , pode-se escrever

$$[\gamma_m] = [T_v]^{-1}([Y][Z])^T[T_v] \quad (2.76)$$

Transpondo ambos os lados da equação (2.50), obtém-se

$$[\gamma_m]^T = ([T_I]^{-1}[Y][Z][T_I])^T \quad (2.77)$$

Reagrupando o lado direito da equação (2.77)

$$[\gamma_m]^T = ([T_l]^{-1}[Y])([Z][T_l])^T \quad (2.78)$$

A equação (2.78) pode ser reescrita como sendo

$$[\gamma_m]^T = ([Z][T_l])^T ([T_l]^{-1}[Y])^T \quad (2.79)$$

Desenvolvendo o lado direito de (2.79), a partir do mesmo desenvolvimento feito na equação (2.78), obtém-se

$$[\gamma_m]^T = ([T_l]^T[Z]^T)([Y]^T([T_l]^{-1})^T) \quad (2.80)$$

Considerando que  $[\gamma_m]$  é uma matriz diagonal, pode-se afirmar que

$$[\gamma_m] = [\gamma_m]^T \quad (2.81)$$

Com base na equação (2.81), pode-se afirmar que as equações (2.76) e (2.80) são idênticas.

$$[T_v]^{-1}[Z]^T[Y]^T[T_v] = ([T_l]^T[Z]^T)([Y]^T([T_l]^{-1})^T) \quad (2.82)$$

Observando a expressão (2.82), verifica-se que

$$[T_v]^{-1} = [T_l]^T \quad (2.83)$$

Vê-se que há uma relação entre as matrizes  $[T_v]$  e  $[T_l]$ , bastando calcular uma e obter a outra através de (2.83).

#### 2.4.4 - Relação entre as Matrizes $[\gamma_m]$ , $[Z_m]$ e $[Y_m]$

Fazendo o produto das equações (2.71) e (2.72)

$$[Z_m][Y_m] = [T_v]^{-1}[Z][T_l][T_l]^{-1}[Y][T_v] \quad (2.84)$$

Desenvolvendo a equação (2.84)

$$[Z_m][Y_m] = [T_v]^{-1}[Z][Y][T_v] \quad (2.85)$$

Comparando as equações (2.49) e (2.85), pode-se afirmar que a matriz  $[\lambda_m]$  pode ser escrita como sendo

$$[\gamma_m] = [Z_m][Y_m] \quad (2.86)$$

Fazendo o produto das equações (2.72) e (2.71)

$$[Y_m][Z_m] = [T_l]^{-1}[Y][Z][T_l] \quad (2.87)$$

Desenvolvendo as equações (2.50) e (2.87)

$$[\gamma_m] = [Y_m][Z_m] \quad (2.88)$$

Pelas equações (2.86) e (2.88), mostra-se que os produtos  $[Z_m][Y_m]$  e  $[Y_m][Z_m]$  são idênticos. Portanto as matrizes  $[Z_m]$  e  $[Y_m]$  são matrizes diagonais.

Substituindo as equações (2.86) e (2.88) nas equações (2.63) e (2.64), obtém-se

$$\frac{d^2[V_m]}{dx^2} = [Z_m][Y_m][V_m] \quad (2.89)$$

$$\frac{d^2[I_m]}{dx^2} = [Y_m][Z_m][I_m] \quad (2.90)$$

As equações (2.89) e (2.90) são as equações diferenciais modais da linha. Uma vez que as matrizes  $[Z_m]$  e  $[Y_m]$  são diagonais, as equações (2.89) e (2.90) estão desacopladas e as soluções conhecidas.

## 2.5 – Linha de Transmissão Trifásica – Domínio Modal

Nas equações da linha, pode-se trabalhar com componentes simétricas, quando se considera a linha balanceada ou os componentes modais para não balanceada. Assim, as relações entre tensões e correntes nos terminais são

$$\begin{bmatrix} V_{Si} \\ I_{Si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Ri} \\ I_{Ri} \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

sendo que  $i$  indica a componente seqüencial ou o modo da grandeza.

### 2.5.1 – Modelo $\pi$ Equivalente

As constantes A, B, C e D da linha são

$$\begin{aligned} A_i &= Z_{Ci} \cosh(\gamma_i \ell) \\ B_i &= Z_{Ci} \sinh(\gamma_i \ell) \\ C_i &= \frac{1}{Z_{Ci}} \sinh(\gamma_i \ell) \\ D_i &= A_i \end{aligned} \tag{2.92}$$

onde

$$\begin{aligned} Z_{Ci} &= \sqrt{\frac{Z_i}{Y_i}} \\ \gamma_i &= \sqrt{Z_i Y_i} \\ Z_i &= R_i + jX_i \\ Y_i &= j\omega C_i \end{aligned} \tag{2.93}$$

### 2.5.2 – Modelo $\pi$ Nominal

As constantes A, B, C e D da linha são dadas por

$$\begin{aligned} A_i &= D_i = 1 + \frac{Z_{ni} Y_{ni}}{2} \\ B_i &= Z_{ni} \\ C_i &= Y_{ni} \left( 1 + \frac{Z_{ni} Y_{ni}}{4} \right) \\ Z_{ni} &= Z_i \ell \end{aligned} \tag{2.94}$$

### 2.5.3 – Modelo Impedância Série

As constantes A, B, C e D da linha são

$$\begin{aligned} A_i &= D_i = 1 \\ B_i &= Z_{ni} \\ C_i &= 0 \end{aligned} \tag{2.95}$$

# 3

## TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Com o advento da proteção digital, algoritmos de localização de faltas têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a precisão nos resultados. O desafio é grande, pois diversos fatores podem contribuir para erros de localização. Além disso, faz-se necessária a adaptação dos localizadores ao sistema elétrico, visando à redução de custos e facilidade de operação.

A precisão dos algoritmos baseados na frequência fundamental é fortemente dependente da estimação dos fasores em relação às grandezas primárias e do modelo de linha utilizado. Em relação aos algoritmos baseados em ondas viajantes [21], estes têm a precisão ligada à taxa de amostragem dos dados e, principalmente, ao tratamento de ruídos presentes nas ondas, oriundos do ambiente externo e dos circuitos eletrônicos de amostragem, que se misturam às ondas de surtos, dificultando sua correta detecção [22, 23, 24].

Uma técnica de análise de circuitos, utilizada por alguns dos métodos a serem apresentados neste capítulo, é o teorema da superposição. Para descrevê-lo, considere inicialmente o circuito da FIG. 3.1(a) em que se apresenta um sistema elétrico em condições normais de operação (ou pré-falta), composto pela linha de transmissão com terminais S e R e fontes equivalentes  $E_S$  e  $E_R$  nas extremidades.

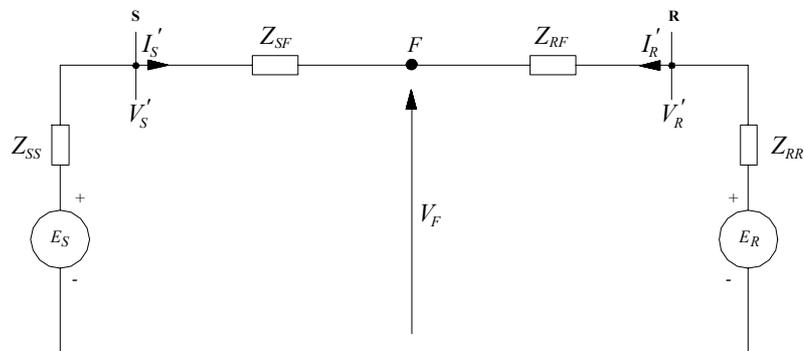


FIGURA 3.1(a) – Circuito pré-falta

Na FIG. 3.1(a),  $V'_S$  e  $V'_R$  são as tensões pré-falta, nos terminais S (local) e R (remoto);  $I'_S$  e  $I'_R$ , as correntes pré-falta, nos terminais S e R;  $Z_{SS}$  e  $Z_{RR}$ , as impedâncias das fontes local e remota; e  $V_F$ , a tensão no ponto  $F$ , situado entre os extremos S e R. Pode-se inserir em  $F$  uma fonte de tensão ideal, cujo valor é o mesmo de  $V_F$ , de modo que não haja corrente e um resistor de valor  $R_F$ , representando a resistência de uma falta que pudesse ocorrer no ponto F. O circuito obtido é mostrado na FIG. 3.1(b).

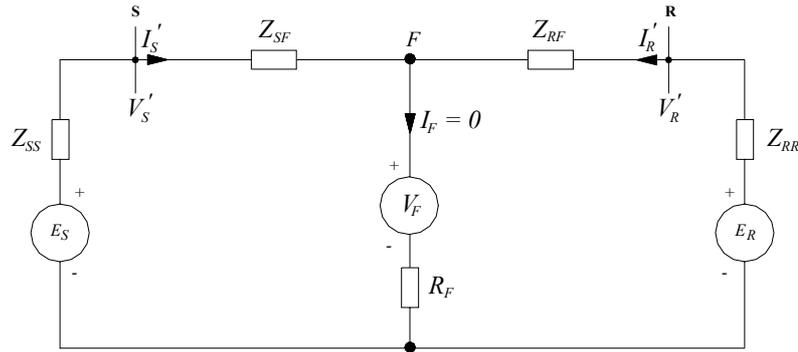


FIGURA 3.1(b) – Circuito pré-falta com a fonte  $V_F$  e a resistência  $R_F$

Do circuito da FIG. 3.1(b), retira-se a fonte  $V_F$ , ligando o ponto  $F$  diretamente em  $R_F$ , provocando um curto-circuito, como mostrado na FIG. 3.1(c), onde se representa o circuito em falta, e  $V_S$ ,  $V_R$ ,  $I_S$  e  $I_R$  correspondem às tensões e correntes de falta nos terminais S e R, respectivamente.

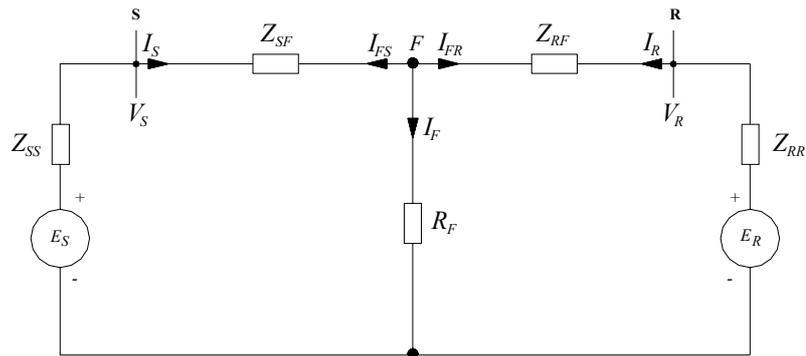


FIGURA 3.1(c) – Circuito em falta

Inserir duas fontes de valor  $V_F$  com polaridades em oposição, no circuito da FIG. 3.1(c), sem alterar o valor de  $I_F$ , resulta no circuito da FIG. 3.1(d).

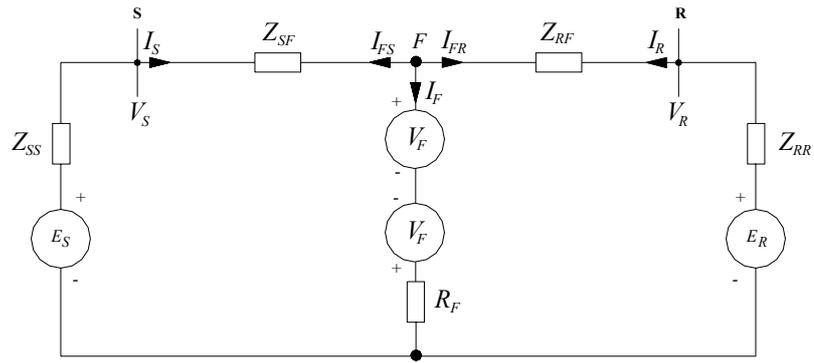


FIGURA 3.1(d) – Circuito em falta com duas fontes em oposição

O teorema da superposição estabelece que o circuito da FIG. 3.1(d) pode ser considerado como a soma do circuito pré-falta da FIG. 3.1(b) com o circuito chamado superposto ou puro de falta, mostrado na FIG. 3.1(e), onde  $V_S''$ ,  $V_R''$ ,  $I_S''$  e  $I_R''$  correspondem às tensões e correntes superpostas nos terminais S e R, e  $I_{FS}''$ ,  $I_{FR}''$ , às correntes superpostas no ponto F.

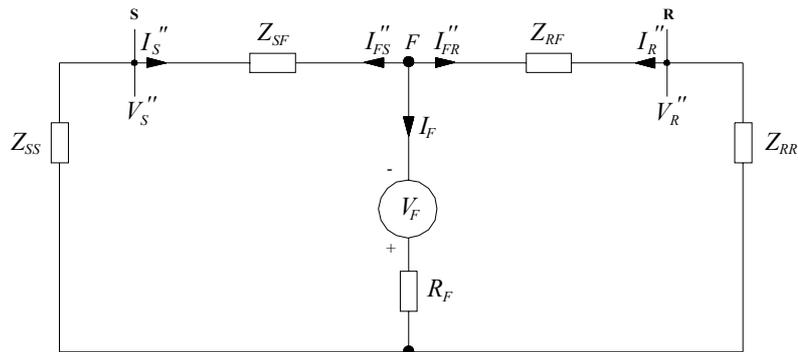


FIGURA 3.1(e) – Circuito superposto ou puro de falta

Na seqüência, apresentam-se algumas técnicas para localização de faltas em linhas de transmissão existentes na literatura, abordando os métodos baseados em fasores e ondas viajantes, utilizando dados de um e dois terminais da linha.

### 3.1 – Algoritmos que Utilizam Dados de Dois Terminais

#### Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines (A. T. Johns, S. Jamali) – 1990 [25]

Considere-se a linha monofásica da FIG. 3.1(c). A tensão pós-falta a uma distância  $x$  do terminal  $S$  pode ser expressa em função das tensões e correntes medidas das extremidades da linha.

$$V_F = \cosh(\gamma x)V_S - Z_C \sinh(\gamma x)I_S \quad (3.1)$$

$$V_F = \cosh(\gamma(\ell - x))V_R - Z_C \sinh(\gamma(\ell - x))I_S \quad (3.2)$$

Igualando-se as equações (3.1) e (3.2) e rearranjando os termos, determina-se a distância para a falta.

$$x = [\operatorname{tgh}^{-1}(-B/A)]/\gamma$$

$$A = Z_C \cosh(\gamma \ell)I_R - \sinh(\gamma \ell)V_R + Z_C I_S \quad (3.3)$$

$$B = \cosh(\gamma \ell)V_R - Z_C \sinh(\gamma \ell)I_R - V_S$$

Os autores sugerem a utilização do modo aéreo para a localização de falhas e apresenta uma forma de sincronização das amostras, através dos valores medidos no intervalo de pré-falta. Em relação à transposição, coloca que esta pode ser assumida, mesmo para linhas com elevado grau de assimetria, sem exceder o limite aceitável de erros de 1% do comprimento da linha, para a maioria dos casos. Os autores fizeram a avaliação de desempenho do algoritmo, usando um programa de simulação em estado estacionário e linhas não transpostas, embora o algoritmo assumira transposição perfeita. As linhas utilizadas foram de 100 e 250 km, de circuito simples horizontal e vertical e de circuito duplo vertical.

O algoritmo não se mostrou sensível ao comprimento e configuração da linha. A resistência de falta foi aumentada para 100 ohms, e os erros para a linha vertical de circuito simples aumentaram, mas permanecendo inferiores a 1,5 %.

De forma a verificar a influência de erros nos parâmetros de entrada, provocaram-se variações de  $\pm 10\%$  na matriz  $[Z]$  da linha horizontal de 250 km. Verificou-se que alterações de  $\pm 5\%$  de  $[Z]$  provocaram um aumento de 0,7% e de  $\pm 10\%$  em  $[Z]$  acarretaram um erro adicional de 1,3% na localização de falhas.

Alterou-se o comprimento da linha horizontal de 250 km em -5%, obtendo-se erro máximo de 4,3%. Em geral, o erro encontrado é menor do que o ajuste feito no comprimento da linha.

De forma a avaliar os erros provocados por transdutores, *hardwares* e fasores, alteraram-se a amplitude dos fasores em  $\pm 2\%$  e a fase em  $\pm 10\%$ , das tensões e correntes dos terminais emissor e receptor para a linha horizontal de 250 km. O erro máximo encontrado para a alteração, somente na magnitude ou no ângulo, foi de 1,5%.

Os valores de seqüência são utilizados para a solução do problema, e a distância é calculada independentemente do tipo de falta. O algoritmo considera a capacitância distribuída e não utiliza as impedâncias equivalentes terminais. É possível trabalhar somente com parâmetros de seqüência positiva da linha, eliminando as incertezas dos parâmetros de seqüência zero.

### **A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines (Adly A. Girgis, David G. Hart, William L. Peterson) – 1992 [3]**

Considere o sistema da FIG. 3.1(c) para o caso trifásico. Assumindo que os fasores de tensões e correntes das barras  $S$  e  $R$  são obtidos sincronizados, pode-se calcular as tensões nas barras a partir da corrente e tensão no ponto de falta, conforme mostrado nas equações (3.4) e (3.5).

$$[V_S] = [V_F] + x[Z][I_S] \quad (3.4)$$

$$[V_R] = [V_F] + (\ell - x)[Z][I_R] \quad (3.5)$$

Das equações (3.4) e (3.5) vem que

$$[V_S] - [V_R] + \ell[Z][I_R] = x[Z]([I_S] + [I_R]) \quad (3.6)$$

onde  $[Z]$  é a matriz de impedâncias série da linha,  $[V_F]$  é o vetor de tensão no ponto de falta. A equação (3.6) pode ser reescrita como

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} x \text{ ou } Y = Mx \quad (3.7)$$

sendo

$$Y_j = V_{jS} - V_{jR} + \ell \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} I_{iR} \quad (3.8)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} (I_{iS} + I_{iR}) \quad (3.9)$$

$$j = a, b, c$$

A equação (3.9) representa 3 (três) equações complexas ou 6 (seis) equações reais e a variável desconhecida  $x$ . A solução para  $x$  pode ser obtida usando-se o estimador de mínimos quadrados.

$$x = (M^+ M)^{-1} M^+ Y \quad (3.10)$$

sendo  $M^+$  a conjugada transposta de  $M$ .

O procedimento é independente do tipo de falta, não requer informações da impedância da fonte e considera a linha não transposta. Os autores apresentam também algoritmos para dados não sincronizados em linhas de dois e três terminais. Os testes submetidos aos algoritmos acusaram erro máximo de 1% em relação ao ponto de falta.

O algoritmo que utiliza o modelo impedância série da linha, desprezando a capacitância, é mais indicado para linhas curtas. A solução é encontrada através do método dos mínimos quadrados e, como trabalha com grandezas de fase, é indicado para ser aplicado a linhas não transpostas.

**Development of an Advanced Transmission Line Fault Location System Part I: Input Transducer Analysis and Requirements (David J. Lawrence, Luis Z. Cabeza, Lawrence T. Hochberg) – 1992 [26]**

Os autores fazem uma análise dos erros de amplitude e fase em transformadores de corrente e potencial, instalados no sistema de transmissão da New York Power Authority's.

Na avaliação dos transformadores de corrente em regime permanente para a corrente de 60 Hz, levantou-se a carga na subestação, de modo a obter valores mais próximos da realidade da instalação. A corrente secundária foi variada até 100 A, e foram levantados os erros da relação de transformação e fase das correntes. Foram encontrados erros de até 1% na magnitude da corrente e 2 (dois) graus na fase. Os erros foram maiores para valores até 10 A e após 80 A. A resposta transitória do TC foi avaliada pela influência da saturação nas formas de onda de corrente. Através do cálculo do fator de saturação, pôde-se verificar o tempo para o início da saturação, em função do *burden* e da corrente de curto-circuito. Os autores verificaram a necessidade de redução de carga do secundário do TC, para reduzir o risco de saturação.

Na avaliação dos transformadores de potencial, determinou-se a carga ligada ao secundário. Variando-se a tensão no secundário de 10 a 140 V, os erros máximos encontrados foram da ordem de 0,5% para a relação de transformação e 0,5 graus na fase.

**Development of an Advanced Transmission Line Fault Location System Part II: Algorithm Development and Simulation (David J. Lawrence, Luis Z. Cabeza, Lawrence T. Hochberg) – 1992 [27]**

Apresentam-se dois algoritmos que fazem uso de um terminal da linha e outro que faz uso dos dois terminais. Em relação aos algoritmos de um terminal, em um deles é necessária a impedância remota das fontes e no outro, mais simples, não se considera a existência da resistência de falta. No algoritmo de dois terminais, determina-se o modelo ABCD para as matrizes trifásicas, e a solução é obtida a partir de uma equação não-linear, em que as variáveis são a resistência de falta e a distância.

Os autores fizeram um estudo de sensibilidade dos algoritmos, com arquivos gerados pelo EMTP (Eletromagnetic Transients Program), variando fatores que podem contribuir para a redução da precisão. Os resultados, de uma forma geral, foram:

a) Parâmetros da linha

As impedâncias próprias e mútuas foram aumentadas e depois reduzidas em 5% e 20%, respectivamente. O melhor desempenho foi do algoritmo de 2 (dois) terminais, mas que não convergiu para os casos de faltas próximas a subestação remota.

b) Impedância equivalente da fonte remota

Apenas o algoritmo de um terminal que utiliza o equivalente da fonte remota foi avaliado. A matriz de impedâncias equivalentes da fonte remota teve seu valor reduzido e ampliado em 5 (cinco) vezes. Os erros são maiores a partir de 60% do comprimento da linha, mas não aumentaram de forma significativa com a variação da impedância da fonte.

c) Efeito do modelamento dos transformadores de corrente

Foram feitas simulações com e sem o modelo detalhado do TC, não tendo sido apresentadas diferenças significativas.

d) Projeto do *hardware*

Verificaram-se erros de até 1,6 km para conversores A/D de até 10 bits, sendo os algoritmos de um terminal mais sensíveis.

No sistema de posicionamento global de satélite, considerou-se que se poderia introduzir erros de sincronização de nanossegundos até um 1ms. Desta forma, provocaram-se, nas amostras, erros de sincronismo de 100  $\mu$ s até 4 ms. Para a diferença de 1 ms (que corresponde a 21,6 graus elétricos em 60 Hz), o erro de localização aumentou em 1,6 km.

Em relação à frequência de amostragem do conversor A/D, foram feitas comparações entre simulações de dados amostrados em 1 e 5 kHz, tendo sido observada similaridade nos resultados.

e) Resistência de falta

O algoritmo de um terminal simplificado e o de dois terminais foram submetidos a faltas com resistência de 2 e 20 ohms. O algoritmo de um terminal apresentou grande erro para faltas de 20 ohms, próximas ao terminal remoto, e o de dois terminais, erro de até 8% do comprimento da linha para carga pesada. Os algoritmos se mostraram sensíveis aos efeitos da carga pré-falta.

**Unsynchronized Two-Terminal Fault Location Estimation (Damir Novosel, David G. Hart, Eric Udren, Jim Garitty) – 1996 [6]**

O artigo apresenta um método de localização de falhas para dados não sincronizados, em cujo equacionamento as variáveis são a distância para a falta e o ângulo de sincronização. Inicialmente, a solução é feita pelo processo de Newton-Raphson para linhas curtas, mas podem ser feitas compensações de forma a se considerar o efeito da capacitância.

**An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines Part I: Theory and Algorithms (Joe-Air Jiang, Jun-Zhe Yang, Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Jih-Chen Ma) – 2000 [5]**

Considere-se o circuito da FIG. 3.1(c). Supondo que a falta ocorreu no ponto  $F$  a uma distância  $x = D \ell$  do terminal  $R$ , a tensão no ponto de falta pode ser expressa por

$$V_F = \frac{1}{2e^{\gamma\ell}} (V_S + Z_C I_S) e^{(D\ell)} + \frac{1}{2} e^{\gamma\ell} (V_S I_S) e^{(-D\ell)} \quad (3.11)$$

$$V_F = \frac{(V_R + Z_C I_R)}{2} e^{(D\ell)} + \frac{(V_R - Z_C I_R)}{2} e^{(-D\ell)} \quad (3.12)$$

Resolvendo as equações (3.11) e (3.12), para o local da falta, tem-se

$$D = \ln\left(\frac{N}{M}\right) 2\gamma\ell \quad (3.13)$$

onde

$$N = \frac{V_R - Z_C I_R}{2} - \frac{V_S - Z_C I_S}{2} e^{\gamma\ell} \quad (3.14)$$

$$M = \frac{V_S + Z_C I_S}{2} e^{(-\gamma\ell)} - \frac{V_R + Z_C I_R}{2} \quad (3.15)$$

Para uma linha trifásica, tem-se

$$D_m = \frac{\ln\{[A_m - C_m]/[E_m - B_m]\}}{2\gamma_m \ell} \quad (3.16)$$

sendo

$$A_m = \frac{1}{2}[V_{Rm} + Z_C I_{Rm}] \quad (3.17)$$

$$B_m = \frac{1}{2}[V_{Rm} - Z_C I_{Rm}] \quad (3.18)$$

$$C_m = \frac{1}{2}e^{-\gamma \ell}[V_{Sm} + Z_C I_{Sm}] \quad (3.19)$$

$$E_m = \frac{1}{2}e^{-\gamma \ell}[V_{Sm} - Z_C I_{Sm}] \quad (3.20)$$

e  $m = 0, \alpha, \beta$ , as componentes de Clarke.

Em sistemas trifásicos, para desacoplar as grandezas de fase, foi utilizada a matriz de transformação de Clarke. No artigo, é apresentado um método de cálculo de parâmetros, com os fasores obtidos a partir dos dados sincronizados amostrados de tensão e corrente, de forma a aumentar a precisão do localizador. Considerando a linha transposta, tem-se

$$Z_{Cm} = \frac{V_{Sm}^2 - V_{Rm}^2}{I_{Sm}^2 - I_{Rm}^2}$$

$$\gamma_m = \cosh^{-1}(K_m) / \ell$$

onde

$$K_m = \frac{V_{Sm} I_{Sm} + V_{Rm} I_{Rm}}{V_{Sm} I_{Rm} + V_{Rm} I_{Sm}}$$

O autor destaca a obtenção de fasores através de uma unidade de medida, denominada STDF (Smart TDF), que leva em consideração desvios na frequência.

**Fault Location Using the Distributed Parameter Transmission Line Model  
(A. Gopalakrishnan, M. Kezunovic, S. M. McKenna, D. M. Hamai) – 2000 [4]**

Os autores partem das equações do telégrafo e chegam às seguintes expressões para o cálculo das tensões e correntes na linha

$$v_{j,k} = \frac{1}{2}[v_{j-1,k-1} + v_{j-1,k+1}] + \frac{Z_C}{2}[i_{j-1,k-1} - i_{j-1,k+1}] + \frac{R\Delta x}{2}[i_{j-1,k-1} + i_{j-1,k+1}] - \frac{R\Delta x}{2}i_{j,k} \quad (3.21)$$

$$i_{j,k} = \frac{1}{2Z_C}[v_{j-1,k-1} + v_{j-1,k+1}] + \frac{1}{2}[i_{j-1,k-1} + i_{j-1,k+1}] + \frac{R\Delta x}{4Z_C}[i_{j-1,k+1} - i_{j-1,k-1}] \quad (3.22)$$

onde  $j$  representa um ponto na linha, e  $k$ , um instante no plano  $x-t$ .

Utilizando as equações (3.21) e (3.22), para cada ponto discreto  $j$  na linha, calcula-se a tensão e corrente, partindo do terminal local e repetindo o procedimento para o terminal remoto. Calculando o quadrado da diferença entre as tensões, observa-se que o ponto de mínimo global indica o local da falta. Para sistemas trifásicos, é utilizada a decomposição modal.

Os autores aplicaram, ao algoritmo, 256 casos simulados de falhas no EMTP, com os dados sincronizados e com uma frequência de amostragem de 20 kHz. O sistema elétrico utilizado possui trechos de transposição e linhas paralelas. O menor erro obtido foi de 400 m, e o maior, de 15 km.

**A Fault Location Algorithm for Transmission Line Based on Distributed Parameter  
(Zheng Chen, Chengmu Luo, Jinxi Su, Xinrong Wu) – 2001 [28]**

Considere-se o circuito da FIG. (3.1c). A tensão no ponto de falta  $F$  pode ser expressa em função das correntes e tensões dos pontos  $S$  e  $R$ .

$$V_F = V_S \cosh(\gamma x) - I_S Z_C \sinh(\gamma x) \quad (3.23)$$

$$V_F = V_R \cosh[\gamma(\ell - x)] - I_R Z_C \sinh[\gamma(\ell - x)] \quad (3.24)$$

Igualando as equações (3.23) e (3.24), o resultado é

$$V_S \cosh(\gamma x) - I_S Z_C \sinh(\gamma x) = V_R \cosh[\gamma(\ell - x)] - I_R Z_C \sinh[\gamma(\ell - x)] \quad (3.25)$$

Rearranjando a equação (3.25), tem-se a distância para a falta.

$$e^{2\beta x} = \left| \frac{e^{\gamma \ell} (V_R - I_R Z_C) - V_S - I_S Z_C}{V_S - I_S Z_C - e^{-\gamma \ell} (V_R + I_R Z_C)} \right| \quad (3.26)$$

A equação (3.26) pode ser reescrita como

$$x = \frac{l}{2\alpha} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{B}{A} \right) \quad (3.27)$$

onde

$$\frac{e^{\gamma \ell} (V_R - I_R Z_C) - V_S - I_S Z_C}{V_S - I_S Z_C - e^{-\gamma \ell} (V_R + I_R Z_C)} = A + jB \quad (3.28)$$

O método pode ser aplicado às linhas trifásicas, sendo independente da impedância das fontes equivalentes terminais e do tipo de falta. Para linhas não transpostas, deve-se encontrar a matriz de autovetores  $[T_V]$  e  $[T_I]$  que diagonalizam  $[Z][Y]$   $[Y][Z]$ , resultando em

$$\begin{aligned} [V_m] &= [T_V]^{-1} [V_F] \\ [I_m] &= [T_I]^{-1} [I_F] \\ [Z_m] &= [T_V]^{-1} [Z] [T_I] \\ [Y_m] &= [T_I]^{-1} [Y] [T_V] \end{aligned}$$

Para cada um dos modos, tem-se

$$\frac{e^{\gamma_m \ell} (V_{mR} - I_{mR} Z_{mC}) - V_{mS} - I_{mS} Z_{mC}}{V_{mS} - I_{mS} Z_{mC} - e^{-\gamma_m \ell} (V_{mR} + I_{mR} Z_{mC})} = A_m + jB_m \quad (3.29)$$

A distância para a falta é dada por

$$x = \frac{l}{2\alpha_m} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{B_m}{A_m} \right) \quad (3.30)$$

Os autores testaram o algoritmo desenvolvido em casos simulados do EMTP para uma linha de 300 km, perfeitamente transposta, variando o tipo de falta, a resistência de falta e o ângulo de incidência. O erro máximo obtido foi de 0,4% do comprimento da linha.

**A New Adaptative PMU Based Protection Scheme for Transposed / Untransposed Parallel Transmission Lines (Ching-Shan, Chin-Wen Liu, Joe-Air Jiang) – 2002 [29]**

Neste artigo, utiliza-se a mesma formulação do trabalho anterior de 2000 [5]. Porém é desenvolvida uma metodologia de cálculo de parâmetros para linhas paralelas não balanceadas, a fim de evitar erros devidos às incertezas nos parâmetros. Os autores submetem o algoritmo a variadas condições de faltas, de forma a testar sua performance, tendo conseguido bons resultados.

**Accurate Location of Faults on Power Transmission Lines With Use of Two-End Unsynchronized Measurements (Jan Izykowski, Rafal Molag, Eugeniusz Rosolowski, Murari Mohan Saha) – 2006 [30]**

Considere-se a linha monofásica da FIG. 3.1(c). A tensão no ponto de falta é dada por

$$\begin{aligned} V_{SF}(x, \delta) &= V_{SF}^{unsynch} (\cos(\delta) + j\text{sen}(\delta)) \\ V_{RF}(x) &= V_R \cosh(\gamma(\ell - x)) - Z_C I_R \text{sen}(\gamma(\ell - x)) \\ V_{SF}^{unsynch}(x) &= V_S \cosh(\gamma x) - Z_C I_S \text{senh}(\gamma x) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Nas equações (3.31), as variáveis são a distância para a falta e o ângulo de sincronização. Pode-se montar uma função da forma

$$F(x, \delta) = V_{SF}(x, \delta) - V_{RF}(x) \quad (3.32)$$

A solução da equação (3.32) é feita através do processo iterativo de Newton-Raphson. É apresentada também uma formulação para linha curtas, mas os autores fazem a observação de que, em certos casos de faltas, pode haver duas soluções, o que exige cálculos adicionais. São utilizadas as componentes superpostas de seqüência positiva, das tensões e correntes, para a localização da falta. Para linhas não transpostas, é sugerido que se determine a matriz de transformação, através da teoria de autovalores e autovetores, para desacoplar os modos.

Uma avaliação do algoritmo foi feita para uma linha de 300 km, com dados simulados de faltas AT e ABT e erro de sincronismo de 18 graus. O algoritmo para o modelo de linha curta apresentou erros máximos de 6,25% da extensão da linha para a

distância e 3,3 graus para o ângulo de sincronismo, na primeira iteração. No modelo de linha longa, o erro máximo para a distância foi de 0,12%, com um máximo de 4 iterações e o erro de sincronismo bastante reduzido.

### 3.2 – Algoritmos que Utilizam Dados de Um Terminal

**Online Digital Fault Locator for Overhead Transmission Line (M. T. Sant, M. Tech, Y. G. Painthakar) – 1979 [31]**

Considere-se o circuito da FIG. 3.1(c). Traçando-se um diagrama de impedâncias para o trecho em falta, tem-se

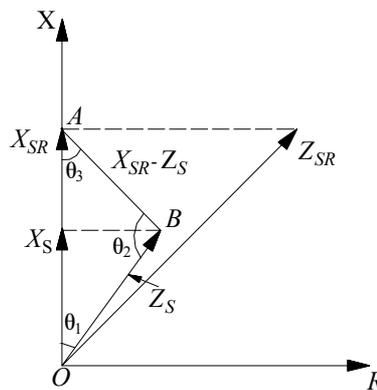


FIGURA 3.2 – Diagrama de impedâncias

A FIG. 3.3 representa o diagrama fasorial obtido, multiplicando-se as impedâncias do triângulo OAB por  $I_S$ .

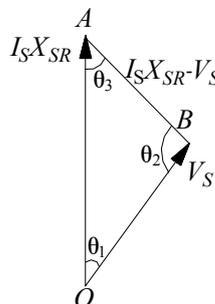


FIGURA 3.3 – Diagrama fasorial

Aplicando-se a lei dos senos para o triângulo OAB da FIG. 3.2, tem-se

$$\frac{Z_S}{\text{sen } \theta_3} = \frac{X_{SR}}{\text{sen } \theta_2} \quad (3.33)$$

Multiplicando-se ambos os lados de (3.33) por  $\cos \theta_1$  e substituindo  $Z_S \cos \theta_1$  por  $X_S$  vem

$$\frac{X_S}{\text{sen } \theta_3} = \frac{X_{SR} \cos \theta_1}{\text{sen } \theta_2} \quad (3.34)$$

ou

$$\frac{X_S}{X_{SR}} = \frac{\text{sen } \theta_3 \cos \theta_1}{\text{sen } \theta_2} \quad (3.35)$$

onde

$$\theta_1 = \arg\left(\frac{X_{SR}}{Z_S}\right) \quad (3.36)$$

e

$$\theta_2 = \arg\left(\frac{-Z_S}{X_{SR} - Z_S}\right) \quad (3.37)$$

ou, conforme FIG. 3.3

$$\theta_1 = \arg\left(\frac{I_S X_{SR}}{V_S}\right) \quad (3.38)$$

$$\theta_2 = \arg\left(\frac{-V_S}{I_S X_{SR} - V_S}\right) \quad (3.39)$$

e

$$\theta_3 = 180 - (\theta_1 + \theta_2) \quad (3.40)$$

Na equação (3.35), observa-se que, conhecendo-se dois dos três ângulos de fase, determina-se a distância para a falta.

O algoritmo não leva em consideração a contribuição da fonte conectada no terminal remoto, o que provoca erros na estimação em presença de resistência de falta. Além disso, considera parâmetros concentrados de linha, o que aumenta os erros, quando aplicado a linhas longas.

Em um artigo do ano de 2002 [32], foi feito um estudo de robustez e precisão deste algoritmo em relação a outros 5 (cinco), concluindo-se ser este o mais indicado para localização de faltas.

**A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I Fourier Transform Method (T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, Sakagushi) – 1981 [33]**

A tensão no ponto F da FIG. 3.1(c) é dada por

$$V_F = R_F I_F \tag{3.41}$$

Do circuito da FIG. 3.1(e)

$$I_F = -(I_{FS}'' + I_{FR}'') \tag{3.42}$$

Substituindo (3.42) em (3.41), chega-se a

$$V_F = -R_F (I_{FS}'' + I_{FR}'') \tag{3.43}$$

Definindo uma nova variável  $k_t(x)$  como

$$k_t(x) = \frac{I_{FR}''}{I_{FS}''} \tag{3.44}$$

Substituindo  $I_{FR}''$  obtida de (3.44) em (3.43),

$$V_F = -R_F I_{FS}'' [1 + k_t(x)] \tag{3.45}$$

Na expressão (3.45),  $V_F$  e  $I_{FS}''$  podem ser determinados por medições disponíveis localmente

$$V_F = A(x)V_S - B(x)I_S \quad (3.46)$$

$$I_{FS}'' = C(x)V_S'' - D(x)I_S'' \quad (3.47)$$

Portanto (3.45) pode ser reescrita apenas com dados obtidos localmente, como

$$A(x)V_S - B(x)I_S = -R_F \{1 + k_t(x)\} \{C(x)V_S'' - D(x)I_S''\} \quad (3.48)$$

o que leva a

$$R_F [1 + k_t(x)] = -\frac{A(x)V_S - B(x)I_S}{C(x)V_S'' - D(x)I_S''} \quad (3.49)$$

A impedância de falta é puramente resistiva, sendo  $R_F$  uma variável real. A razão  $k_t(x)$  também se torna real, na condição de que a linha de transmissão seja de baixa perda e as impedâncias das fontes dos dois terminais sejam puramente indutivas. Estes fatos implicam que o lado esquerdo de (3.49) é um valor real. Portanto o lado direito deve também ser, para que a equação seja verdadeira.

A equação básica do localizador torna-se

$$\Im m \left[ \frac{A(x)V_S - B(x)I_S}{C(x)V_S'' - D(x)I_S''} \right] = 0 \quad (3.50)$$

onde  $\Im m [\cdot]$  representa a parte imaginária de uma variável complexa. A solução para (3.50) é a distância da extremidade local da linha ao ponto de falta. Como (3.50) é não-linear, é necessária a utilização de métodos indiretos ou iterativos.

Este algoritmo é um dos principais da classe de um terminal. Uma das fontes de erro é considerar o fator de distribuição real.

**Developments of A New Type of Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data (T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, T. Matsushima) – 1982 [34]**

Pela análise das FIG. 3.1(a) a 3.1(e), pode-se escrever

$$V_F = I_F R_F = (I_{SF} + I_{RF}) R_F = (I_{SF}'' + I_{RF}'') R_F \quad (3.51)$$

A tensão  $V_F$  e a corrente  $I_{SF}''$  podem ser expressas em valores disponíveis do terminal S da seguinte forma

$$V_F = V_S \cosh(\gamma x) - Z_C I_S \sinh(\gamma x) \quad (3.52)$$

$$I_{SF}'' = \frac{V_S''}{Z_C} \sinh(\gamma x) - I_S'' \cosh(\gamma x) \quad (3.53)$$

A corrente de falta  $I_F$  pode ser expressa em função de  $I_{SF}''$

$$I_F = I_{SF}'' + I_{RF}'' = I_{SF}'' \left( 1 + \frac{I_{RF}''}{I_{SF}''} \right) \quad (3.54)$$

Fazendo

$$1 + \frac{I_{RF}''}{I_{SF}''} = \zeta e^{j\theta} \quad (3.55)$$

e substituindo (3.55) em (3.54)

$$I_F = I_{SF}'' \zeta e^{j\theta} \quad (3.56)$$

Combinando (3.53), (3.54), (3.55) e (3.56), tem-se

$$V_S - I_S Z_C \operatorname{tgh}(\gamma x) = \left[ I_S'' - \frac{V_S''}{Z_C} \operatorname{tgh}(\gamma x) \right] \zeta e^{j\theta} R_F \quad (3.57)$$

Comparando as partes real e imaginária de (3.57), tem-se

$$\Re[V_S - I_S Z_C \operatorname{tgh}(\gamma x)] = -\Re \left\{ \left[ \frac{V_S''}{Z_C} \operatorname{tgh}(\gamma x) - I_S'' \right] e^{j\theta} \right\} \zeta R_F \quad (3.58)$$

$$\Im[V_S - I_S Z_C \operatorname{tgh}(\gamma x)] = -\Im \left\{ \left[ \frac{V_S''}{Z_C} \operatorname{tgh}(\gamma x) - I_S'' \right] e^{j\theta} \right\} \zeta R_F \quad (3.59)$$

A partir das identidades representadas pelas equações (3.58) e (3.59), pode-se afirmar que

$$\Im \left\{ [V_S - I_S Z_C \operatorname{tgh}(\gamma x)] \left[ \frac{V_S''}{Z_C} \operatorname{tgh}(\gamma x) - I_S'' \right]^* e^{-j\theta} \right\} = 0 \quad (3.60)$$

onde \* representa o conjugado da expressão entre colchetes.

Em (3.60) não se conhecem os valores de  $\theta$  e  $x$  (distância para a falta). Considerando  $\theta$  igual a zero e usando as aproximações seguintes na equação (3.60), obtém-se, através da solução da equação (3.61), a distância  $x$  com dados de apenas um terminal.

$$\operatorname{tgh}(\gamma x) \cong \gamma x$$

e

$$\frac{V_S''}{Z_C} \operatorname{tgh}(\gamma x) \ll I_S''$$

$$x = \frac{\Im(V_S I_S^{**})}{\Im(Z_C \gamma I_S I_S^{**})} \quad (3.61)$$

A equação (3.61) é resolvida por métodos iterativos. Segundo o autor, o Digital Fault Locator (DFL) apresentou bons resultados durante longo período de testes em campo. Inicialmente, despreza-se o efeito da capacitância transversal, que é compensado, posteriormente, no valor obtido em (3.61).

**Accurate Fault Impedance Locating Algorithm (A. Wiszniewski) – 1983 [35]**

Considere-se o circuito em falta da FIG. 3.4.

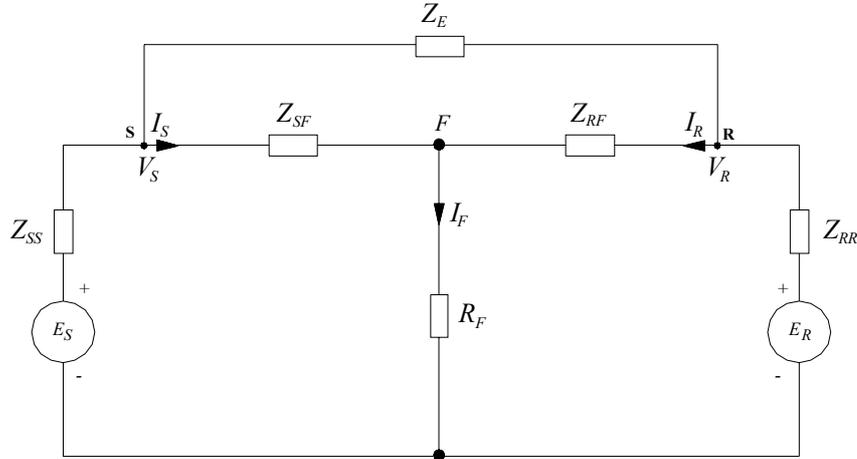


FIGURA 3.4 – Circuito em falta com  $Z_E$

A impedância medida do ponto S pode ser expressa por

$$Z_S = \frac{V_S}{I_S} = \frac{Z_{SF} I_S + R_F I_F}{I_S} \quad (3.62)$$

Reescrevendo (3.62)

$$Z_S = Z_{SF} + R_F \left( \frac{I_F}{I_S} \right) \quad (3.63)$$

A corrente de falta total é a soma da corrente de falta pura  $I_S''$  e da corrente de carga  $I_S'$

$$I_S = I_S' + I_S'' \quad (3.64)$$

Pode-se expressar  $I_S''$  em função de  $I_F$

$$I_S'' = k_w I_F \quad (3.65)$$

sendo  $k_w$  o fator de distribuição de corrente de falta dado por

$$k_w = \frac{(Z_{RF} + Z_{RR})Z_E + (Z_{SS} + Z_{RR})Z_{RF}}{(Z_{SS} + Z_{SF} + Z_{RR} + Z_{RF})Z_E + (Z_{SF} + Z_{RF})(Z_{SS} + Z_{RR})} \quad (3.66)$$

$$k_w = |k_w| e^{j\theta}$$

Substituindo (3.65) em (3.64), tem-se a seguinte equação para  $I_F$

$$I_F = \frac{I_S - I'_S}{k_w} \quad (3.67)$$

Levando (3.67) em (3.63)

$$Z_S = Z_{SF} + \frac{R_F}{|k_w|} \left( \frac{I_S - I'_S}{I_S e^{j\theta}} \right) \quad (3.68)$$

A reatância medida do ponto S é

$$X_S = X_{SF} + \frac{R_F}{|k_w|} \Im m \left( \frac{I_S - I'_S}{I_S e^{j\theta}} \right) \quad (3.69)$$

O ângulo  $\theta$ , fase do fator de distribuição  $k_w$ , é normalmente pequeno, uma vez que as impedâncias do lado direito de (3.66) têm ângulos similares. O maior valor pode ser esperado, se a falta ocorre no extremo oposto da linha em relação ao localizador, mas geralmente não excede 10 graus em sistemas elétricos de potência [35].

Reescrevendo (3.68) com as partes real e imaginária separadas, tem-se

$$X_{SF} = X_S - \frac{R_F}{|k_w|} b \quad (3.70)$$

e

$$R_{SF} = R_S - \frac{R_F}{|k_w|} a \quad (3.71)$$

sendo

$$a = \Re e \left( \frac{I_S - I'_S}{I_S e^{j\theta}} \right) \quad (3.72)$$

e

$$b = \Im m \left( \frac{I_S - I'_S}{I_S e^{j\theta}} \right) \quad (3.73)$$

Nas equações (3.70) e (3.71), o termo  $R_F/|k_w|$  é desconhecido e precisa ser eliminado. Sabe-se que o trecho em falta tem impedância

$$Z_{SF} = R_{SF} + jX_{SF} = |Z_{SF}| \angle \phi_{SF} \quad (3.74)$$

e que a linha de transmissão tem uma impedância

$$Z_{SR} = R_{SR} + jX_{SR} = |Z_{SR}| \angle \phi_{SR} \quad (3.75)$$

Fazendo a aproximação  $\phi_{SF} = \phi_{SR}$ , tem-se que  $tg\phi_{SF} = tg\phi_{SR}$ . Assim, pode-se escrever

$$tg\phi_{SR} = \frac{X_{SF}}{R_{SF}} \quad (3.76)$$

Dividindo-se (3.70) por (3.71) e utilizando a expressão (3.76), vem

$$\frac{X_{SF}}{R_{SF}} = tg\phi_{SR} = \frac{X_S - \frac{R_F}{|k_w|} b}{R_S - \frac{R_F}{|k_w|} a} \quad (3.77)$$

Desenvolvendo (3.77)

$$R_S tg\phi_{SR} - \frac{R_F}{|k_w|} a tg\phi_{SR} = X_S - \frac{R_F}{|k_w|} b \quad (3.78)$$

e

$$R_S \operatorname{tg} \phi_{SR} = \frac{R_F}{|k_w|} (a \operatorname{tg} \phi_{SR} - b) + X_S \quad (3.79)$$

chega-se a

$$\frac{R_F}{|k_w|} = \frac{R_S \operatorname{tg} \phi_{SR} - X_S}{a \operatorname{tg} \phi_{SR} - b} \quad (3.80)$$

Substituindo (3.80) em (3.70), resulta que

$$X_{SF} = X_S - \frac{R_S \operatorname{tg} \phi_{SR} - X_S}{\frac{a}{b} \operatorname{tg} \phi_{SR} - 1} \quad (3.81)$$

A reatância  $X_{SF}$ , que é proporcional à distância entre o ponto S e a falta, pode ser determinada por (3.81). A precisão na compensação do erro devido a  $R_F$  depende dos valores assumidos para  $\phi_{SR}$  e  $\theta$ . O algoritmo utiliza parâmetros concentrados na descrição da linha de transmissão, sendo mais adequado a linhas curtas, e o fator de distribuição é dependente das fontes equivalentes terminais.

**An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote and Infeed (L. Erikson, M. M. Saha, G. D. Rockfeller) – 1985 [36]**

Do circuito em falta da FIG. 3.1(c), tem-se

$$V_S = xZ I_S + R_F I_F \quad (3.82)$$

onde  $Z$  é a impedância longitudinal unitária da LT. A corrente de falta  $I_F$  pode ser colocada em função da corrente  $I_S$ , resultando

$$I_F = \frac{I_S''}{D_A} \quad (3.83)$$

onde  $D_A$  é o fator de distribuição de corrente de defeito dado por

$$D_A = \frac{(\ell - x)Z + Z_{RR}}{Z_{SS} + \ell Z + Z_{RR}} \quad (3.84)$$

sendo  $\ell$  o comprimento total da linha. Levando-se o valor de  $D_A$  em (3.84), substituindo a expressão resultante em (3.82) e efetuando-se as devidas simplificações, tem-se

$$x^2 - k_1 x + k_2 - k_3 R_F = 0 \quad (3.85)$$

sendo

$$k_1 = \frac{V_S}{I_S Z} + \frac{Z_{RR}}{Z} + \ell \quad (3.86)$$

$$k_2 = \frac{V_S}{I_S Z} \left( \frac{Z_{RR}}{Z} + \ell \right) \quad (3.87)$$

$$k_3 = \frac{I_S''}{I_S Z} \left( \frac{Z_{SS} + Z_{RR}}{Z} + \ell \right) \quad (3.88)$$

Representando-se (3.85) por suas partes real e imaginária, segue que

$$x^2 - x \Re\{k_1\} + \Re\{k_2\} - R_F \Re\{k_3\} = 0 \quad (3.89)$$

$$-x \Im\{k_1\} + \Im\{k_2\} - R_F \Im\{k_3\} = 0 \quad (3.90)$$

Isolando-se o valor de  $R_F$  em (3.89) e substituindo-o em (3.90), obtêm-se uma equação de segundo grau, com apenas uma raiz positiva, indicando a distância da falta relativa ao terminal S.

Este algoritmo não parte da premissa de que os argumentos das correntes terminais de contribuição são iguais. Utiliza parâmetros concentrados de linha, o que o torna mais adequado para linhas curtas. O fator de distribuição é dependente das impedâncias das fontes equivalentes terminais.

**New Technique for the Accurate Location of Earth Faults on Transmission Systems. (A. T. Johns, P. J. Moore, R. Whittard) – 1995 [37]**

Analisando a FIG. 3.5, a expressão para determinação da impedância de falta pode ser derivada.

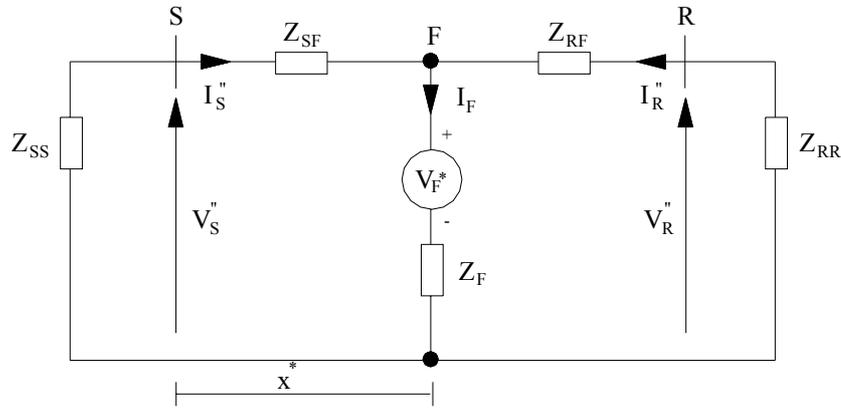


FIGURA 3.5 – Circuito superposto

$$Z_F^* = \frac{[V_F^* - V_S'' + I_S'' x^* Z][(\ell - x^*)Z + Z_{RR}]}{V_S'' - I_S''(Z + Z_{RR})} \quad (3.91)$$

A equação (3.91) fornece o valor de  $Z_F^*$  para qualquer posição  $x^*$  suposta para a falta. Sendo conhecido que o valor de  $Z_F^*$  é puramente resistivo, o local da falta pode ser encontrado para o valor de  $x^*$ , no qual a parte imaginária de  $Z_F^*$  é igual a zero.

O método necessita do valor da impedância do circuito equivalente do terminal remoto. Nos testes realizados pelo autor, no ATP, a precisão do algoritmo foi razoável, mostrando-se robusta quanto a possíveis erros na impedância equivalente da fonte remota.

**A New Technique Using Wavelet Analysis for Fault Location (Xia Yibin, David Chan Tat Wai, W. W. Keerthipala – 1997 [38])**

Neste artigo, emprega-se a transformada de Wavelet para obter a componente de frequência fundamental das ondas pós-falta. Um dos níveis do banco construído extrai as frequências em uma faixa que contém a fundamental, como de 39,06 a 78,13 Hz. Os resultados de faltas simuladas mostram erros menores de localização utilizando Wavelet, se comparados com os obtidos por Fourier.

**Distance Protection and Fault Location Utilizing Only Phase Current (M. B. Djurié, Z. M. Radojevié, V. V. Terzija) – 1998 [39]**

Do circuito em falta da FIG. 3.1(c) para uma linha trifásica, a tensão de entrada é dada por

$$V_S = [Z_1 I_S + (Z_0 - Z_1) I_0] x + 3R_F I_{0F} \quad (3.92)$$

onde  $I_S$  é a corrente para a fase em falta e  $I_{0F}$  é a corrente de seqüência zero no ponto de falta, calculada por

$$I_{0F} = I_0 \frac{Z_{SS0} + Z_{RR0} + Z_0 x}{Z_{RR0} + Z_0(\ell - x)} = \frac{I_0 Z_{0e}}{Z_{RR0} + Z_0(\ell - x)} \quad (3.93)$$

sendo

$$Z_{0e} = Z_{SS0} + Z_{RR0} + Z_0 x$$

Substituindo (3.93) em (3.92)

$$K_2 x^2 - K_1 x + K_0 + R_F K = 0 \quad (3.94)$$

onde

$$K_2 = CZ_0 \quad e \quad C = Z_1 I_S + (Z_0 - Z_1) I_0$$

$$K_1 = V_S Z_0 + CZ_{SS0}$$

$$K_0 = V_S Z_{RR0}$$

$$K = 3I_0 Z_{0e}$$

Separando a equação (3.94) nas partes real e imaginária

$$K_{2r} x^2 - K_{1r} x + K_{0r} + R_F K_r = 0 \quad (3.95)$$

$$K_{2i} x^2 - K_{1i} x + K_{0i} + R_F K_i = 0$$

onde os índices (r) e (i) denotam a parte real e imaginária do coeficiente complexo. Eliminando a resistência de falta  $R_F$ , obtém-se uma equação quadrática com a variável  $x$ .

$$(K_i K_{2r} - K_r K_{2i})x^2 + (K_r K_{1i} - K_i K_{1r})x + (K_i K_{0r} - K_r K_{0i}) = 0 \quad (3.96)$$

A equação (3.96) fornece duas soluções e, se ambas são positivas e menores que o comprimento da linha, não é possível determinar qual é a correta. O problema pode ser resolvido, utilizando um dos algoritmos apresentados.

### Algoritmo 1

A seguinte expressão pode ser derivada do equivalente de seqüência negativa.

$$I_{2F} = I_2 \frac{Z_{SS1} + Z_{RR2} + Z_1 \ell}{Z_{RR2} + Z_1(\ell - x)} = \frac{I_2 Z_{2e}}{Z_{RR2} + Z_1(\ell - x)} \quad (3.97)$$

Igualando (3.94) e (3.97), obtém-se

$$x = \frac{I_0 Z_{0e} (Z_{RR2} + Z_1 \ell) - I_2 Z_{2e} (Z_{RR2} + Z_0 \ell)}{I_0 Z_{0e} Z_1 - I_2 Z_{2e} Z_0} \quad (3.98)$$

### Algoritmo 2

Do equivalente de seqüência positiva, tem-se

$$I_{1F} = (I_1 - I_L) \frac{Z_{SS1} + Z_{RR1} + Z_1 \ell}{Z_{RR1} + Z_1(\ell - x)} = \frac{(I_{S1} - I_L) Z_{1e}}{Z_{RR1} + Z_1(\ell - x)} \quad (3.99)$$

Igualando as expressões (3.97) e (3.99), a seguinte expressão pode ser obtida

$$Z_1 x = \frac{(I_1 - I_L) Z_{1e} (Z_{RR2} + Z_1 \ell) - I_2 Z_{2e} (Z_{RR2} + Z_1 \ell)}{(I_1 - I_L) Z_{1e} - I_2 Z_{2e}} \quad (3.100)$$

O algoritmo requer o valor das impedâncias dos equivalentes terminais da linha. Os valores obtidos na localização necessitam da aplicação de fatores de correção dependentes da distância de falta calculada e do comprimento da linha. As vantagens do método, segundo os autores, são a facilidade de implementação em relés digitais e não serem necessários os valores medidos de tensão.

**A New Transmission Line Fault Locating System (Thompson Adu) – 2001 [40]**

Considere a FIG. 3.1(c) para o caso trifásico. Para uma falta fase-terra, a tensão e a corrente no terminal local são dadas por

$$I_S = I_{0S} + I_{1S} + I_{2S} \quad (3.101)$$

$$V_S = x(I_{0S}Z_0 + I_{1S}Z_1 + I_{2S}Z_1) + I_f R_f \quad (3.102)$$

Expandindo e rearranjando as equações (3.101) e (3.102) e tomando somente a parte imaginária, a distância pode ser expressa por

$$x = \frac{\text{Im}\{V_S(I_{1S})^* e^{-j\phi}\}}{\text{Im}\{Z_1 I_S(I_{1S})^* e^{-j\phi}\}} \quad (3.103)$$

sendo  $\phi$  o argumento do fator de distribuição.

O algoritmo foi utilizado em um equipamento comercial. O autor apresenta vários resultados da aplicação em casos reais de curto-circuito, tendo sido obtido erro máximo de 5% em relação ao comprimento da linha.

**Digital Fault-Location Algorithm Including Grounding Impedance at Fault Place (LJ. M. Povović, Z. M. Radojević) – 2001 [41]**

O autor mostra, no artigo, o efeito na localização da falta do valor real da impedância de aterramento. Considere a equação (3.104), onde se pode determinar a distância para a falta em uma linha de transmissão

$$x = \frac{V_S - 3rI_0 Z_k}{Z_L(I_S + k_0 I_0)} \quad (3.104)$$

$$r = \left(1 - \frac{Z_{pm}}{Z_{pr}}\right) \quad (3.105)$$

sendo  $k_0$  o fator de compensação de seqüência zero,  $r$  o fator de redução,  $Z_{pm}$  a impedância mútua entre o cabo pára-raio e o condutor fase por vão,  $Z_{pr}$  a impedância própria do cabo pára-raio por vão e  $Z_k$  função da impedância de aterramento da torre, dada através de gráficos.

O autor apresentou resultados para linhas curtas e longas, mais precisos quando se utiliza a formulação apresentada. Percebe-se também a grande influência do tipo de cabo pára-raio utilizado.

**Optimizing Solution of Fault Location (Dong Xinzhou, Chen Zheng, He Xuanzhov, Wang Kechong, Luo Chengmu) – 2002 [42]**

O algoritmo utiliza um método fasorial para determinar uma faixa provável onde está contido o local da falta, com frequência de amostragem em 2 kHz. Em seguida, aplica-se a transformada de Wavelet ao sinal de corrente, amostrado em 400 kHz. Como pode haver vários picos após o primeiro, existe a dificuldade em identificar qual deve ser utilizado. Confrontando os resultados com o do método fasorial, determina-se o local real da falta.

O autor apresentou bons resultados para faltas com baixa e alta resistência de falta, em uma linha de 200 km simulada no EMTP.

# 4

## PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

### 4.1 – Introdução

Algoritmos para localização de faltas em linhas de transmissão contêm rotinas que lidam com os dados de entrada, desde sua obtenção junto aos registradores instalados nas subestações até o momento de aplicação dos algoritmos específicos de localização de falta. As rotinas anteriores ao processo de estimação da distância são de fundamental importância. Quando é feita a gravação pelos registradores, os dados não estão representados de uma forma adequada e também não estão com todas as informações necessárias diretamente disponíveis para sua utilização imediata. Neste capítulo, serão descritas as técnicas aplicadas aos dados, desde sua entrada até o momento da aplicação dos algoritmos de localização.

A localização de faltas é um procedimento *off-line*, ao contrário da proteção de distância, que deve tomar a decisão de *trip* com rapidez, sendo o fator tempo fundamental. Embora compartilhem de aspectos comuns em seus algoritmos, estas duas funções têm um objetivo final diferente. Na proteção de distância, o mais importante é a confiabilidade da proteção e a rapidez de atuação. Na localização de faltas, como não há limitação de tempo, no que se refere à proteção do sistema, é possível desenvolver ou melhorar os algoritmos que, mesmo exigindo maior esforço computacional, possam fornecer o local da falta com maior precisão. Pode-se também viabilizar uma análise das ocorrências, de forma a fornecer subsídios aos operadores, para um melhor entendimento das contingências do sistema elétrico.

Os programas de localização de faltas podem operar de forma automática, ou seja, a partir da leitura dos arquivos de entrada, estar aptos a fornecer a distância. A experiência, porém, tem mostrado que cem por cento de acerto ainda é um objetivo a ser alcançado, principalmente nas etapas de detecção (início e fim) e identificação da falta. Sendo a localização um procedimento *off-line*, é possível ao operador ter uma confirmação visual, através das ondas plotadas, bem como intervir, se necessário, caracterizando um procedimento semi-automático.

Os estágios de um algoritmo de localização de faltas podem variar conforme as informações requeridas pelo mesmo. Desta forma, pode não haver necessidade de identificação da falta ou ser necessário sincronizar os dados no tempo. A seguir, são descritas as rotinas de pré-processamento para um localizador, conforme FIG. 4.1.

O ponto inicial é a obtenção dos dados digitalizados de tensões e correntes. Os passos seguintes envolvidos no processo são: pré-condicionamento dos sinais de entrada, estimação dos fasores fundamentais, determinação do instante da falta, identificação e, finalmente, o método de solução, baseado em equações que calculam a distância até o ponto de falta.

## 4.2 – Entrada dos Dados de Tensão e Corrente

Os dados relativos às tensões e correntes do sistema elétrico monitorado são obtidos de um arquivo. No caso de faltas simuladas, pode ser um arquivo ASCII do tipo “.out” de saída do ATP ou em formato semelhante como, por exemplo, no padrão COMTRADE [43], resultantes de dados reais oscilografados. Destes arquivos, devem ser previamente removidas as linhas referentes aos dados de entrada e quaisquer comentários, mantendo um mesmo intervalo de amostragem, como exposto a seguir, ao ser apresentada parte de um arquivo de dados de entrada.

N	t	va	vb	vc	ia	ib	ic
00	0.0000E+00	-5.16644E+01	-4.72805E+02	5.24469E+02	5.96381E-01	-5.72637E-01	-2.37434E-02
02	1.0000E-04	-2.99184E+01	-4.84992E+02	5.14911E+02	6.07899E-01	-5.58739E-01	-4.91600E-02
04	2.0000E-04	-8.13793E+00	-4.96501E+02	5.04639E+02	6.18554E-01	-5.44048E-01	-7.45055E-02
06	3.0000E-04	1.36534E+01	-5.07306E+02	4.93652E+02	6.28329E-01	-5.28585E-01	-9.97441E-02
08	4.0000E-04	3.54243E+01	-5.17391E+02	4.81967E+02	6.37212E-01	-5.12370E-01	-1.24841E-01
10	5.0000E-04	5.71449E+01	-5.26742E+02	4.69597E+02	6.45189E-01	-4.95427E-01	-1.49762E-01

A primeira coluna se refere aos instantes, a segunda, aos tempos (em segundos), da terceira à quinta, tensões de fase (em kV) e da sexta à oitava, correntes (em kA). Do ponto de vista de localização de faltas, as tensões e correntes podem estar em qualquer unidade, desde que compatíveis, ou seja, kV - kA, V - A, pu - pu.

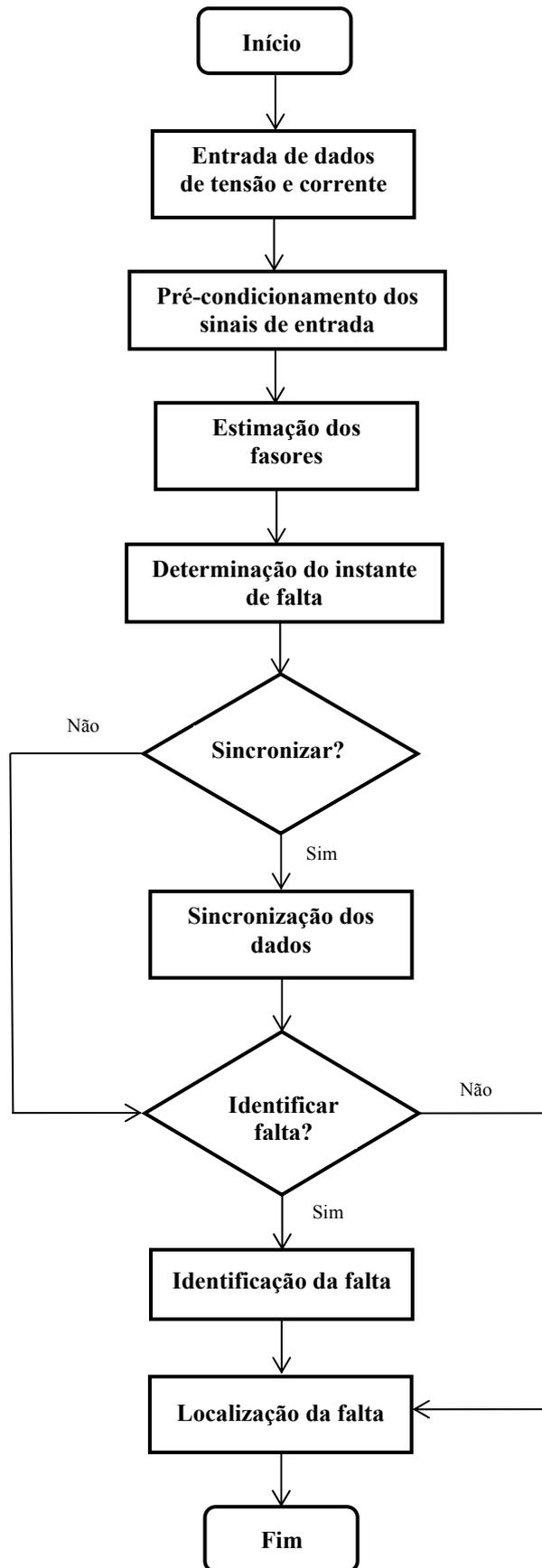


FIGURA 4.1 – Algoritmo de localização de faltas

### 4.3 – Filtragem Passa-baixa

Os valores pós-falta de correntes e tensões podem apresentar transitórios de altas frequências, que conduzem a erros na localização da falta [44]. Assim, antes de qualquer processamento nos sinais de entrada, é essencial um correto pré-processamento destes dados. A tarefa inicial é, então, uma filtragem passa-baixa, sendo o filtro utilizado o de Butterworth de 2<sup>a</sup> ordem, em razão de sua simplicidade, efetividade e por ser um dos mais utilizados na área, com frequência de corte de 100 Hz [45]. Na FIG. 4.2, mostra-se a amplitude da resposta em frequência do filtro empregado, para os dados com uma frequência de amostragem de 1920 Hz, valor adotado por diversos fabricantes de registradores. Na prática, os dados de entrada são recebidos de diversas linhas e podem ter taxas de amostragem diferentes, dependendo das características do equipamento utilizado ou do valor escolhido para gravação do arquivo em dados simulados. Na FIG. 4.3 mostram-se as tensões de fase em uma linha trifásica onde ocorreu uma falta AT a 50 km, e as mesmas filtradas, onde se pode verificar a eliminação das altas frequências nestas tensões.

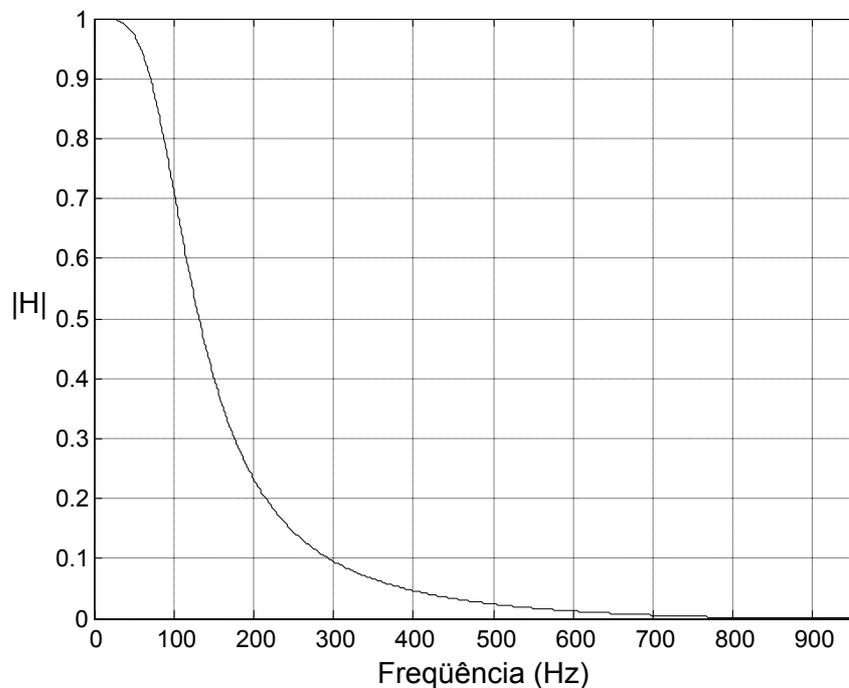


FIGURA 4.2 - Resposta em frequência para um filtro de Butterworth de ordem 2

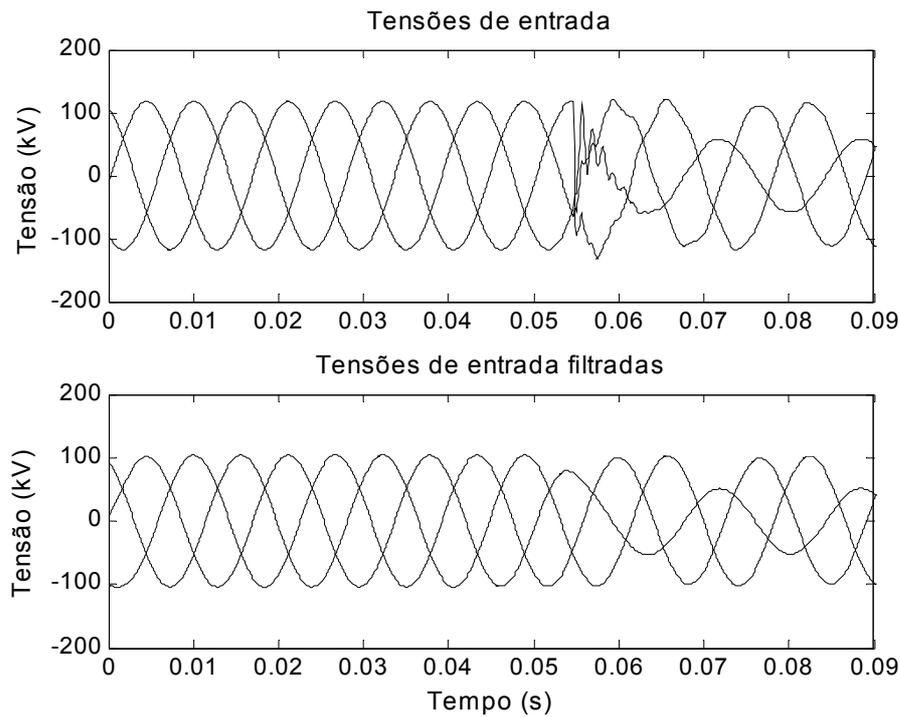


FIGURA 4.3 – Ondas de tensões de entrada e filtradas para um curto-circuito AT

#### 4.4 – Interpolação dos Dados Filtrados

As rotinas de programa posteriores ao processo da filtragem necessitam de dados amostrados a uma frequência igual a

$$f_a = NPC f_0 \quad (4.1)$$

onde  $NPC$  representa o número de pontos amostrados por ciclo da frequência fundamental e  $f_0$ , a frequência fundamental. Os dados podem, conforme a origem, ter diferentes taxas de amostragem. Assim é feita uma normalização da taxa, padronizando-a em 960 Hz, ou 16 pontos por ciclo, através de uma interpolação linear nos dados filtrados. Na FIG. 4.4, apresenta-se uma onda de tensão filtrada, com uma frequência de amostragem de 2000 Hz, e a onda obtida por interpolação com frequência de amostragem de 960 Hz,  $NPC = 16$ .

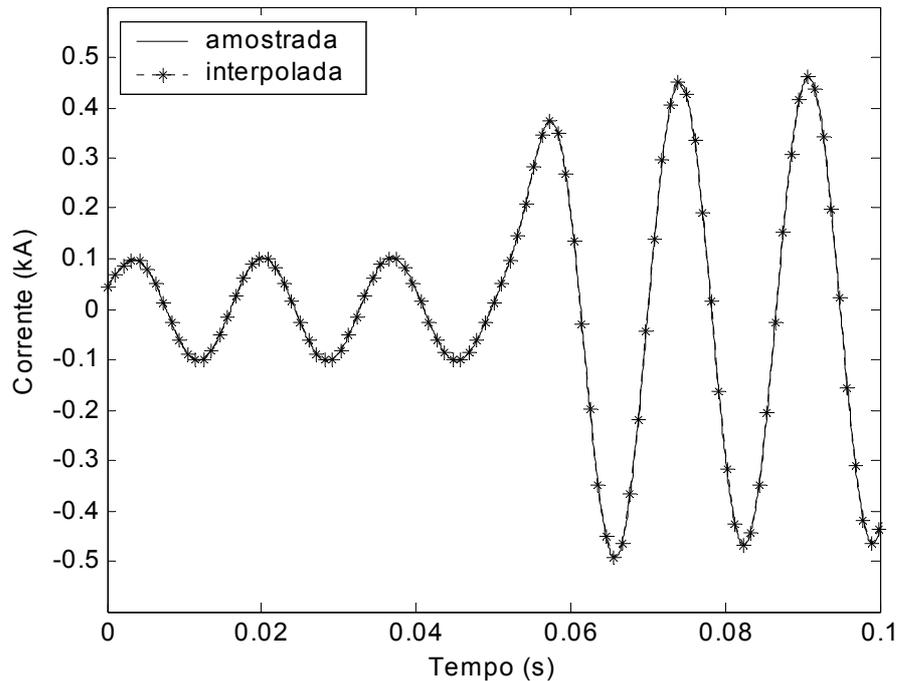


FIGURA 4.4 – Ondas de corrente original e a obtida por interpolação

## 4.5 – Estimação dos Fasores Fundamentais

Os valores de corrente e tensão das ondas pós-falta podem apresentar componente contínua e, mesmo após a filtragem passa-baixa, ter algum conteúdo harmônico. A localização de faltas, utilizando informações provenientes da frequência fundamental, requer uma correta extração dos fasores fundamentais das ondas de entrada, de modo a não influenciar negativamente os resultados, obtendo-se um maior grau de precisão na localização da falta.

Para a tarefa de estimação dos fasores fundamentais, foi escolhida uma variação [45] do método dos erros mínimos quadrados de Sachdev & Baribeau [46]. Nesta abordagem, para determinação dos fasores consideraram-se os sinais de entrada de tensão e corrente, formados por uma exponencial decrescente e onda senoidal fundamental da forma

$$y(t) = a_0 e^{-t/\tau} + a_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + \nu'(t) \quad (4.2)$$

onde  $\omega_0$  é a frequência angular fundamental e  $\nu'(t)$ , o erro cometido ao se aproximarem as amostras pela função composta da exponencial e da senóide. Em seguida, consideraram-se

aproximações polinomiais para a exponencial decrescente, através da série de Taylor, como apresentado na equação (4.3)

$$e^{-t/\tau} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 + \dots \quad (4.3)$$

Truncando-se a série de Taylor no segundo termo e substituindo o resultado obtido em (4.2), tem-se

$$y(t) = a_0 - \left(\frac{a_0}{\tau}\right)t + a_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + v(t) \quad (4.4)$$

onde  $v(t)$  é o erro  $v'(t)$  anterior mais o erro que se cometeu ao considerar apenas as duas primeiras parcelas da expansão de Taylor.

Reescrevendo-se a equação (4.4) de outra maneira, chega-se em

$$y(t) = a_0 + a_1 \cos \phi_1 \text{sen}(\omega_0 t) + a_1 \text{sen} \phi_1 \cos(\omega_0 t) - \left(\frac{a_0}{\tau}\right)t + v(t) \quad (4.5)$$

ou ainda

$$y(t) = \theta_1 + \theta_2 \text{sen}(\omega_0 t) + \theta_3 \cos(\omega_0 t) + \theta_4 t + v(t) \quad (4.6)$$

onde os coeficientes de  $\theta_1$  a  $\theta_4$  correspondem a

$$\begin{aligned} \theta_1 &= a_0 \\ \theta_2 &= a_1 \cos \phi_1 \\ \theta_3 &= a_1 \text{sen} \phi_1 \\ \theta_4 &= -a_0 / \tau \end{aligned} \quad (4.7)$$

A função  $y(t)$  expressa em (4.6) pode ser escrita na forma matricial como

$$y(t) = \bar{x}^T(t) \cdot \bar{\theta} + v(t) \quad (4.8)$$

sendo  $\bar{x}$  o vetor de regressores e  $\bar{\theta}$  o vetor de coeficientes, dados por

$$\bar{x}^T(t) = [1 \quad \text{sen} \omega_0 t \quad \cos \omega_0 t \quad t] \quad (4.9)$$

$$\bar{\theta}^T = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4] \quad (4.10)$$

Em (4.8), tomando-se  $m$  amostras  $y(t_k) = y_k$  em instantes discretos  $t_k = k\Delta t$ , o vetor  $\bar{x}^T(t)$  torna-se  $\bar{x}^T(t_k)$ . Colocando na forma matricial, as  $m$  equações podem ser escritas para o instante  $k$  na forma

$$\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ y_{k-2} \\ y_{k-3} \\ y_{k-4} \\ y_{k-5} \\ y_{k-6} \\ \vdots \\ y_{k-(m-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\omega_0 t_k & \cos \omega_0 t_k & t_k \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-1} & \cos \omega_0 t_{k-1} & t_{k-1} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-2} & \cos \omega_0 t_{k-2} & t_{k-2} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-3} & \cos \omega_0 t_{k-3} & t_{k-3} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-4} & \cos \omega_0 t_{k-4} & t_{k-4} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-5} & \cos \omega_0 t_{k-5} & t_{k-5} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-6} & \cos \omega_0 t_{k-6} & t_{k-6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-(m-1)} & \cos \omega_0 t_{k-(m-1)} & t_{k-(m-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

e no instante  $k+1$ , tem-se

$$\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_k \\ y_{k-1} \\ y_{k-2} \\ y_{k-3} \\ y_{k-4} \\ y_{k-5} \\ \vdots \\ y_{k-(m-2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k+1} & \cos \omega_0 t_{k+1} & t_{k+1} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_k & \cos \omega_0 t_k & t_k \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-1} & \cos \omega_0 t_{k-1} & t_{k-1} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-2} & \cos \omega_0 t_{k-2} & t_{k-2} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-3} & \cos \omega_0 t_{k-3} & t_{k-3} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-4} & \cos \omega_0 t_{k-4} & t_{k-4} \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-5} & \cos \omega_0 t_{k-5} & t_{k-5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-(m-2)} & \cos \omega_0 t_{k-(m-2)} & t_{k-(m-2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ou seja,

$$\underbrace{\bar{Y}}_{(mx1)} = \underbrace{\tilde{X}}_{(mx4)} \cdot \underbrace{\bar{\theta}}_{(4x1)} \quad (4.13)$$

onde  $\bar{Y}$  é o vetor das amostras conhecidas,  $\tilde{X}$  a matriz dos regressores e  $\bar{\theta}$  o vetor dos coeficientes desejados. A solução, para um número de amostras maior que o número de coeficientes, pode ser obtida pelo método da pseudo-inversa [47, 48], determinando-se assim o vetor dos coeficientes  $\bar{\theta}$  expresso por

$$\bar{\theta} = \left( \tilde{X}^T \cdot \tilde{X} \right)^{-1} \cdot \tilde{X}^T \cdot \bar{Y} \quad (4.14)$$

O fasor associado à fundamental é calculado através dos coeficientes  $\theta_2$  e  $\theta_3$ , dados por

$$Y = \theta_2 + j\theta_3 = |Y|e^{j\alpha} \quad (4.15)$$

Na FIG. 4.5, mostra-se a resposta em frequência do filtro de mínimos quadrados, para a janela de dados de um ciclo, 16 pontos por ciclo, considerando os dois primeiros termos da componente contínua e os termos da fundamental.

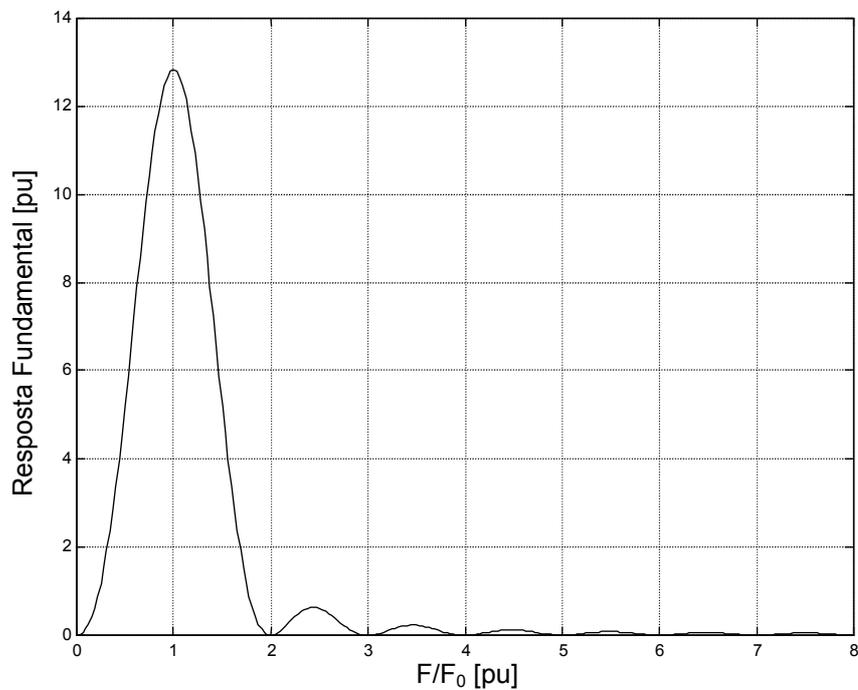


FIGURA 4.5 – Resposta em frequência do filtro dos erros mínimos quadrados

Nas FIG. 4.7 e 4.8, mostram-se a amplitude e a fase dos fasores estimados a partir da falta real, plotada na FIG. 4.6.

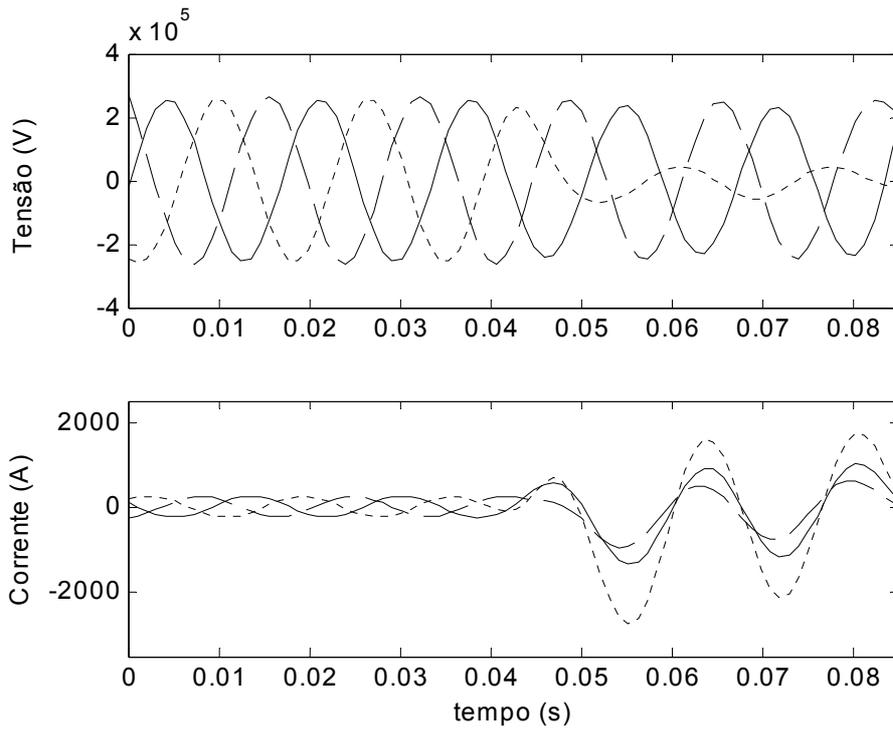


FIGURA 4.6 – Ondas de tensão e corrente de uma falta real, após aplicação do filtro passa-baixa

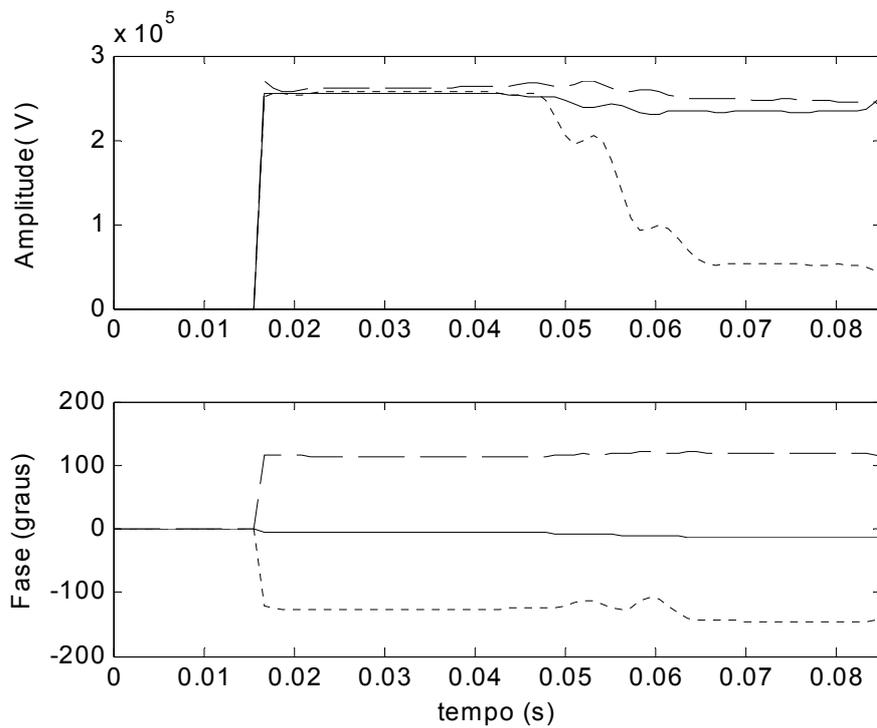


FIGURA 4.7 – Amplitude e fase dos fasores estimados a partir das ondas de tensão da FIG. 4.6

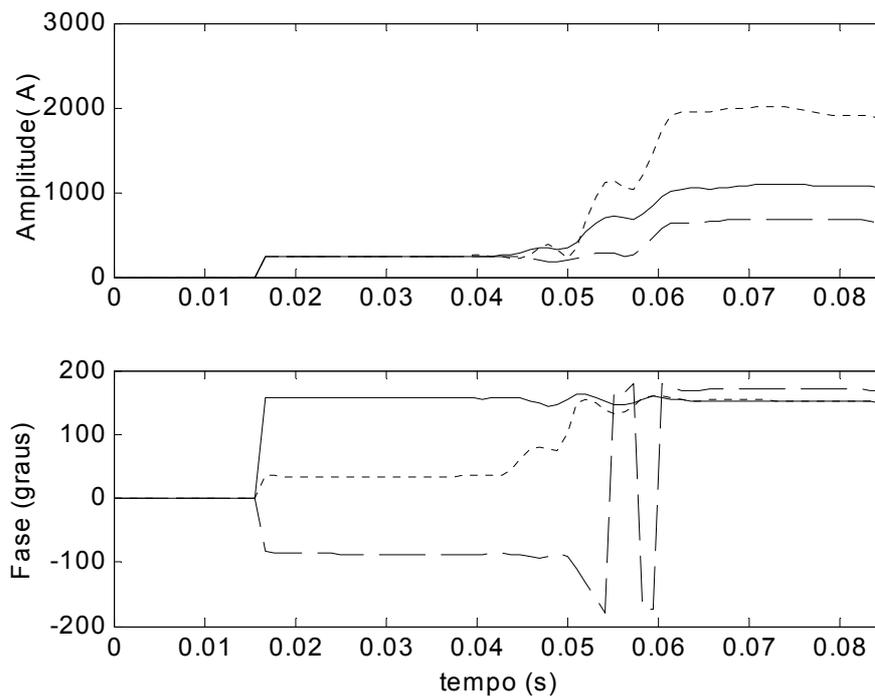


FIGURA 4.8 – Amplitude e fase dos fasores estimados a partir das ondas de corrente da FIG. 4.6

Nota-se, nestas figuras, que os valores estimados durante o período de tempo subsequente ao curto-circuito apresentam oscilações e comportamento muitas vezes não esperado, principalmente devido ao fato de a janela de dados apresentar valores pré e pós-falta, comprometendo as estimativas.

## 4.6 – Detecção do Instante da Falta

Para a localização de faltas, é importante que se determine a amostra na qual a falta tem início, de modo a se obterem dois conjuntos de dados bem definidos, dos períodos pré e pós-falta. O instante de detecção da falta é feito através de um monitor de transitórios cujo princípio é explicado a seguir.

O filtro de mínimos quadrados, citado no item anterior, utiliza um conjunto de amostras contidas em uma janela de dados para estimar os fasores de frequência fundamental. Quando a janela contém amostras do período de pré e pós-falta, como mostrado na FIG. 4.9, as estimativas de tensão e corrente não são confiáveis e se distanciam do valor verdadeiro.

- Janela A: contém somente amostras pré-falta.
- Janelas B, C e D: contêm amostras pré e pós-falta.
- Janela E: contém somente amostras pós-falta.

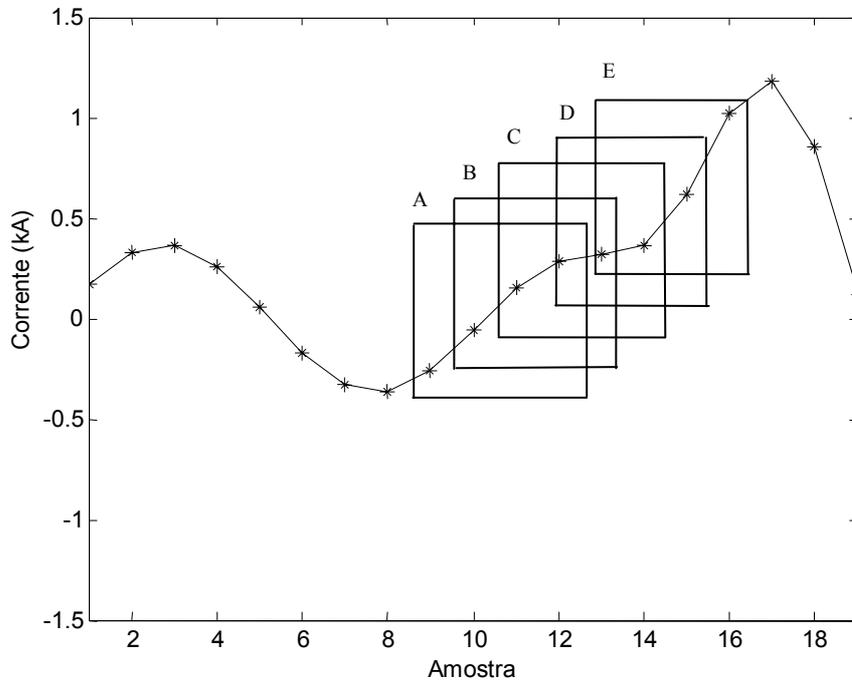


FIGURA 4.9 – Janelas de dados

Na FIG. 4.10, tem-se uma onda de corrente amostrada  $i(t)$  (com dados pré e pós-falta) e a onda estimada  $\hat{i}(t)$ . Nota-se que estas ondas apresentam grandes diferenças nos instantes iniciais da falta (que ocorre na amostra 38), quando as janelas de dados estão contaminadas.

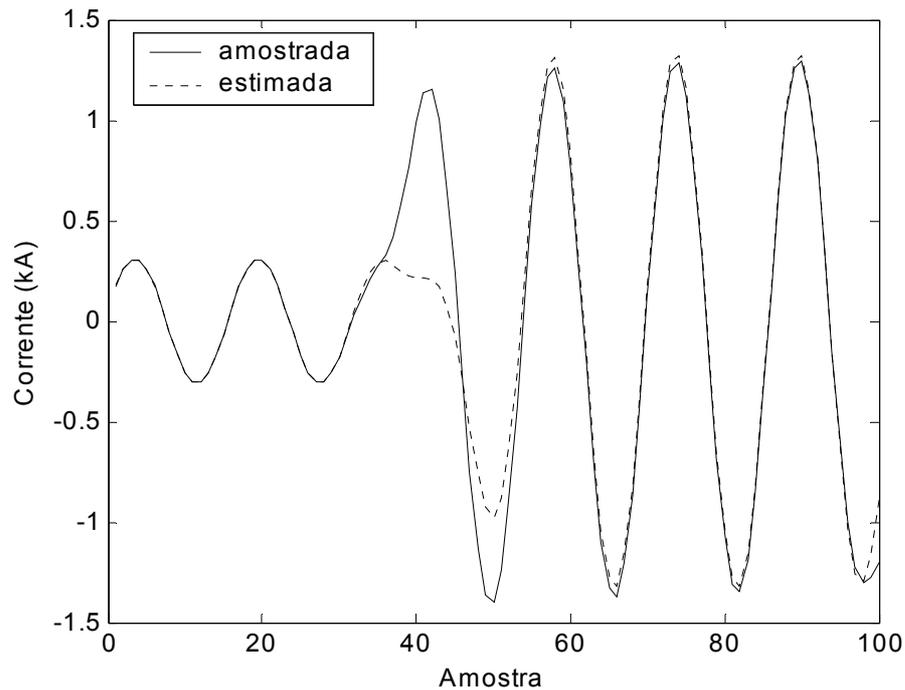


FIGURA 4.10 – Ondas de corrente amostrada e estimada

Denotando-se os valores amostrados conhecidos, resultantes da filtragem passa-baixa por  $y$ , e os valores estimados de  $\hat{y}$ , pode-se calcular os resíduos

$$r_k = y_k - \hat{y}_k \quad (4.16)$$

Para a detecção do instante da falta, o monitor de transitórios registra os resíduos gerados e soma seus módulos a cada janela de dados [44], de forma que

$$M_k = \sum_{i=0}^{NPC-1} |r_{k-i}| \quad (4.17)$$

onde  $M_k$  é o valor do monitor de transitórios em cada instante  $k$ ,  $r_{k-i}$  é o resíduo gerado pela amostra  $k-i$  da janela de dados e  $NPC$ , o número de pontos amostrados por ciclo da fundamental.

Uma mudança significativa (definida por um ajuste) no valor de  $M$  indica que ocorreu um transitório. A verificação da natureza do mesmo, ou seja, se é ou não uma falta, é feita pela rotina de identificação. Com este processo, pode-se determinar o instante em que ocorreu a falta, tornando possível a separação dos dados como desejado.

Para detecção do instante de falta, são utilizadas unidades de monitores de transitórios das correntes instantâneas de fase, resultantes da filtragem passa-baixa.

Para se determinarem os valores instantâneos estimados  $\hat{y}_k$ , utiliza-se a seguinte expressão

$$\hat{y}_k = |Y| \text{sen}(\omega_0 t_k + \alpha) \quad (4.18)$$

sendo que o módulo  $|Y|$  e o ângulo  $\alpha$  são dados por (4.15). Na FIG. 4.11, é apresentada a evolução do valor de  $M$  para as ondas de corrente da FIG. 4.10.

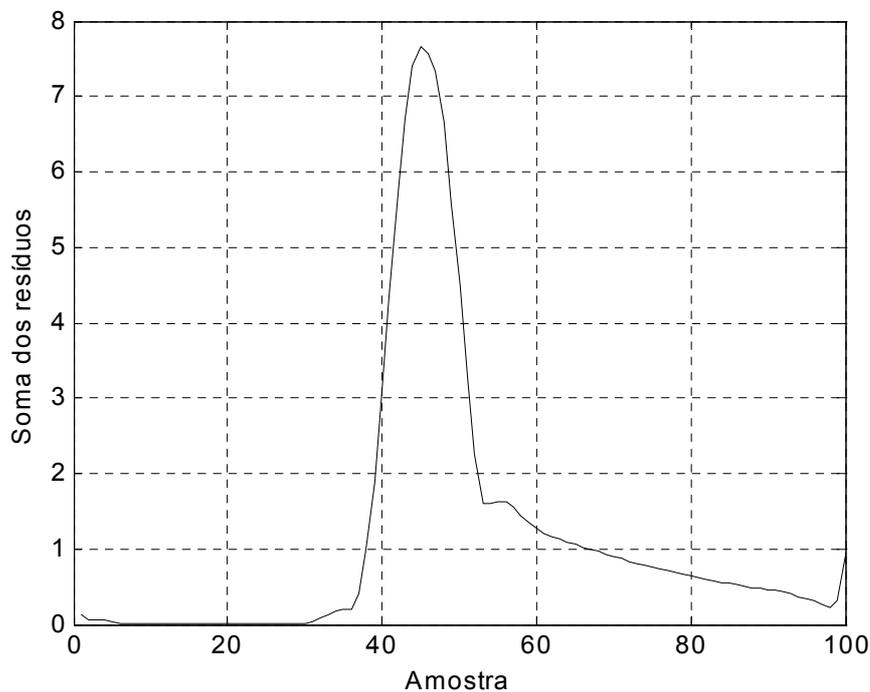


FIGURA 4.11 – Monitor de transitórios para o exemplo da FIG. 4.10

## 4.7 – Sincronização dos Dados

Os métodos que fazem uso dos dados de dois terminais da linha necessitam estar sincronizados no tempo. Ocorre que pode haver problemas nos registradores digitais de perturbações ou no sistema GPS. É importante, então, que se tenha um procedimento de sincronização, de forma a aumentar a precisão e robustez desses localizadores.

Neste trabalho, utilizam-se as tensões e correntes medidas no terminal remoto, no período pré-falta, de forma a calcular a defasagem entre os dados dos dois terminais, aplicando quadripolos, conforme sugerido em [16]. Assim, tem-se

$$\begin{aligned} V'_R e^{j\delta} &= AV'_S - BI'_S \\ \delta &= -j \ln \left( \frac{AV'_S - BI'_S}{V'_R} \right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

As tensões, correntes e as constantes A e B são de seqüência positiva. Para a utilização de grandezas diretamente no domínio de fases, o sincronismo é feito de forma semelhante, sendo que, para uma linha trifásica, as matrizes das constantes do quadripolo têm ordem 3.

$$\begin{bmatrix} V'_R \\ I'_R \end{bmatrix} e^{j\delta} = \begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_S \\ I'_S \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

## 4.8 – Identificação da Falta

Detectado o transitório, tem início a rotina de identificação da falta, que permite facilitar a restauração e manutenção da linha, fornecendo o tipo de curto-circuito ocorrido e, conseqüentemente, as fases envolvidas. Esta informação poderá também ser utilizada pelo algoritmo de localização, caso se necessite determinar qual tipo de falta ocorreu.

O princípio é o mesmo utilizado no item 4.6, sendo 4 unidades de monitores: três de corrente das fases (*ia*, *ib* e *ic*) e mais uma de corrente do neutro (*in*) obtida pela soma das correntes *ia*, *ib* e *ic*. Pode ser visto, na FIG. 4.11, que a curva de *M* apresenta um ponto de máximo, e este deve ser determinado para cada uma das unidades para identificar o tipo de falta, da seguinte forma:

- Se  $P_m(M_{ia}) > \alpha \cdot P_m(M_{ib})$  e  $P_m(M_{ia}) > \alpha \cdot P_m(M_{ic}) \Rightarrow$  unidade *ia* ativada
- Se  $P_m(M_{ib}) > \alpha \cdot P_m(M_{ia})$  e  $P_m(M_{ib}) > \alpha \cdot P_m(M_{ic}) \Rightarrow$  unidade *ib* ativada
- Se  $P_m(M_{ic}) > \alpha \cdot P_m(M_{ia})$  e  $P_m(M_{ic}) > \alpha \cdot P_m(M_{ib}) \Rightarrow$  unidade *ic* ativada

- Se unidade *ia* ativada  

$$\text{Se } P_m(M_{in}) > \alpha \cdot P_m(M_{ia}) \Rightarrow \text{unidade } in \text{ ativada}$$
- Se unidade *ib* ativada  

$$\text{Se } P_m(M_{in}) > \alpha \cdot P_m(M_{ib}) \Rightarrow \text{unidade } in \text{ ativada}$$
- Se unidade *ic* ativada  

$$\text{Se } P_m(M_{in}) > \alpha \cdot P_m(M_{ic}) \Rightarrow \text{unidade } in \text{ ativada}$$

onde  $P_m$  é o ponto de máximo da curva de  $M$  da respectiva unidade, e  $\alpha$  é o ajuste para as unidades de fase e terra. Na FIG.4.12, têm-se os registros das unidades de identificação para uma falta AT. A identificação, em função das unidades ativadas, é feita conforme indicado na TAB. 4.1.

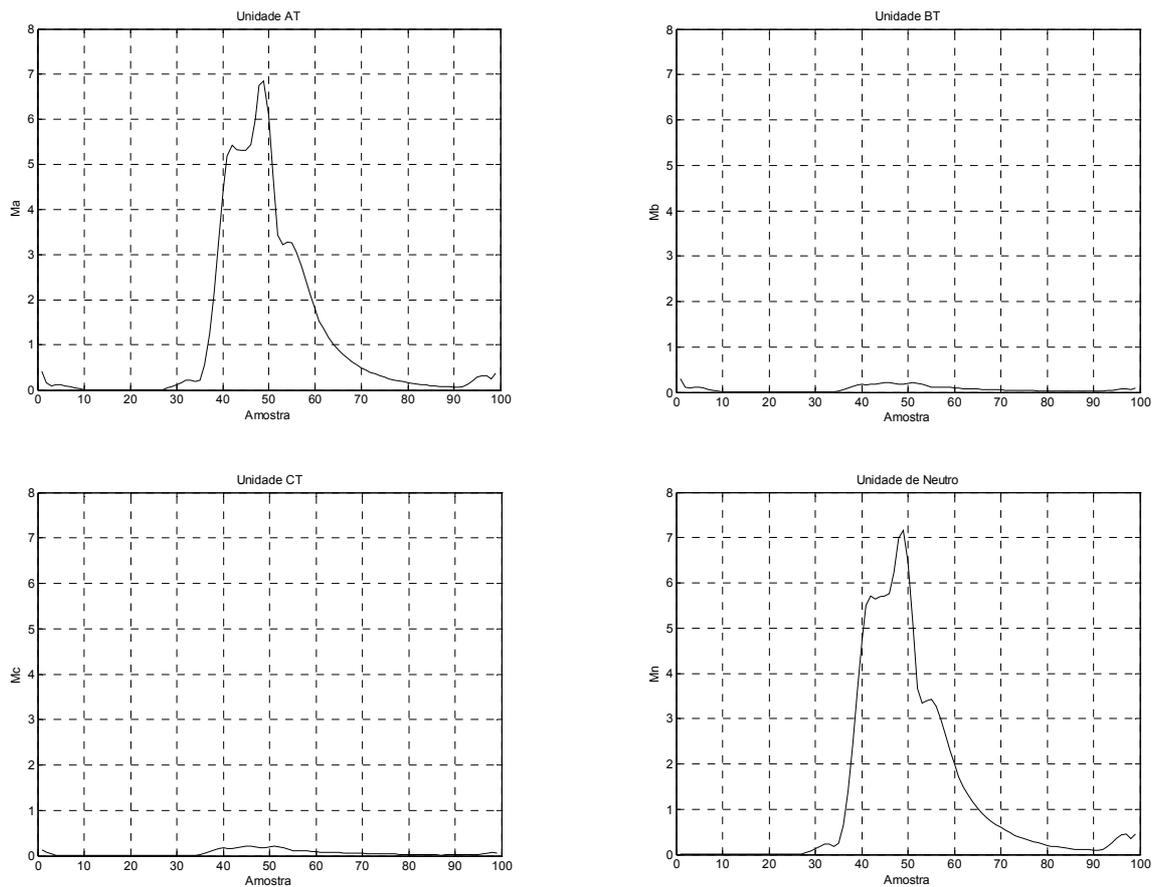


FIGURA 4.12 – Unidades do monitor de transitórios resultantes de uma falta AT para identificação

TABELA 4.1 – Identificação da falta

Tipo de Falta	Unidades de monitor ativadas
AT	$ia \bar{ib} \bar{ic} in$
BT	$\bar{ia} ib \bar{ic} in$
CT	$\bar{ia} \bar{ib} ic in$
AB	$ia ib \bar{ic} \bar{in}$
BC	$\bar{ia} ib ic \bar{in}$
CA	$ia \bar{ib} ic \bar{in}$
ABT	$ia ib \bar{ic} in$
BCT	$\bar{ia} ib ic in$
CAT	$ia \bar{ib} ic in$
ABC	$ia ib ic \bar{in}$

# 5 FONTES DE ERROS EM LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A precisão dos localizadores de falhas pode ser influenciada, de uma forma geral, por vários fatores. Algumas fontes de erros são de difícil intervenção como as geradas por transformadores de proteção e pelo processo de aquisição de dados. Outras podem ser minimizadas na formulação de algoritmos, como a redução da influência do fluxo de carga. O *infeed* de corrente, que exerce um importante efeito nos resultados dos localizadores de um terminal, em faltas com resistência, pode ter seu efeito reduzido, ao se selecionar o lado da linha com a fonte mais forte ou com menor impedância de curto-circuito, para aplicação do algoritmo [7]. Aspectos importantes, norteadores da aplicação ou do desenvolvimento de algum algoritmo, estão relacionados à influência da impedância de seqüência zero, ao domínio de estudo e à transposição da linha. Em linhas próximas ou de circuito duplo, a impedância mútua pode contribuir para o aumento dos erros, no processo de localização de falhas. Em localizadores de dois terminais, erros de sincronismo nos dados podem levar a respostas incorretas. Neste capítulo, busca-se verificar o efeito de alguns desses fatores nos localizadores de falhas, empregando-se os algoritmos de Johns [25], com a solução também em componentes de fase, e Takagi [33].

A solução no domínio de fases emprega as matrizes das impedâncias características e dos fatores de propagação, assim como os vetores de tensão e corrente, conforme mostrado no capítulo 2. Para o método de Johns, a distância ao ponto de falta é o valor de  $x$ , que leva a função da equação (5.1) para o mínimo, sendo necessário identificar o tipo de falta, para fazer a correta localização.

$$F(x) = |[V_{FS}(x)] - [V_{FR}(x)]| \quad (5.1)$$

$$\left. \begin{aligned} [V_{FS}] &= \cosh([\gamma_v x]) [V_S''] - [Z_C] \sinh([\gamma_i x]) [I_S''] \\ [V_{FR}] &= \cosh([\gamma_v x]) [V_R''] - [Z_C] \sinh([\gamma_i x]) [I_R''] \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

A geometria e os parâmetros das linhas de circuito simples de 138 kV e 345 kV, utilizadas nas simulações para gerar os arquivos de faltas, constam no anexo. Suas características diferem, entre outros aspectos, em relação ao plano de simetria. O erro obtido pelos algoritmos é expresso em função do comprimento total da linha, dado pela equação (5.3). Do ponto de vista prático, a apresentação do erro em quilômetros facilita o entendimento para a equipe de manutenção.

$$e(\%) = \frac{(local\ estimado - local\ real)}{comprimento\ da\ linha} \times 100 \quad (5.3)$$

Nos casos reais de curto-circuito, é calculado também o erro médio obtido pelos algoritmos, para o total de casos analisados. Isto é feito para que seja verificado o desempenho alcançado, para um conjunto de arquivos de faltas. Importantes variações no valor do erro podem ocorrer de uma falta a outra, em função de diversos fatores, como características da linha de transmissão, do curto-circuito e da precisão dos parâmetros da linha fornecidos pela concessionária.

## 5.1 – A Influência do Solo

No equacionamento dos algoritmos de localização de faltas baseados em fasores, necessita-se dos parâmetros da linha determinados na frequência fundamental, que, no caso do sistema elétrico brasileiro, é de 60 Hz. Desvios nos valores de entrada dos parâmetros, em relação ao valor real, provocam erros nos resultados, podendo comprometer os esforços de se realizar um pré-processamento adequado dos dados de entrada, ou de se desenvolver algoritmos robustos como, por exemplo, em relação ao valor da resistência de falta.

Os parâmetros sofrem influências de diversos fatores e são calculados a partir de algumas simplificações na geometria, no efeito do solo e outras. Na determinação das matrizes de impedâncias e admitâncias, é necessária a especificação de um valor de resistividade do solo, apesar de a mesma estar sujeita a fatores como umidade e heterogeneidade. Nas FIG. 5.1 e 5.2, tem-se a variação da indutância com a resistividade, calculada pelo método de Deri [12], na frequência de 60 Hz, considerando a linha de 345 kV perfeitamente transposta e os domínios de fases e modal. Observa-se que as indutâncias próprias, mútuas e de seqüência zero sofrem variação, o que não ocorre com a indutância de seqüência positiva.

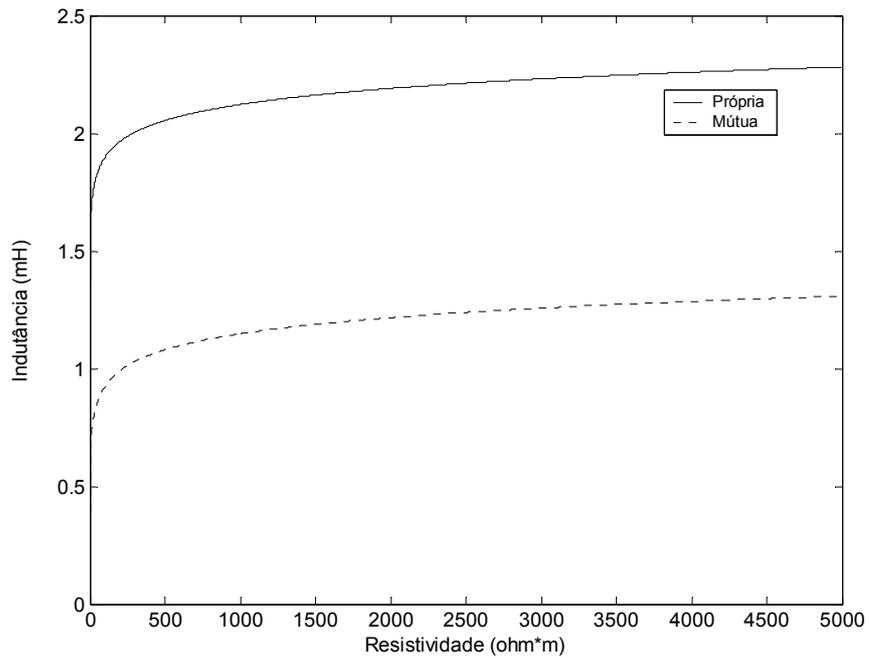


FIGURA 5.1 – Variação das indutâncias próprias e mútuas com a resistividade

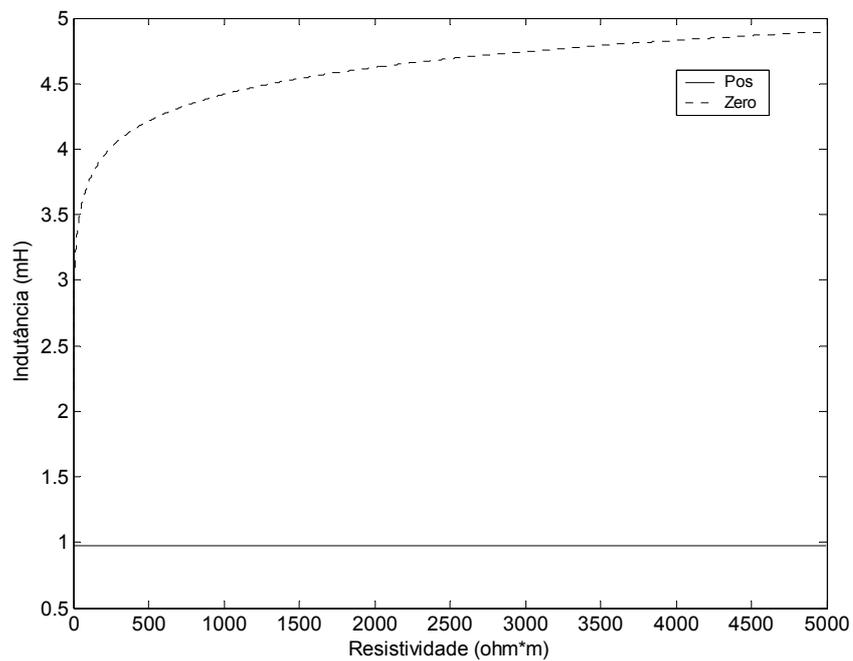


FIGURA 5.2 – Variação das indutâncias de seqüência positiva e zero com a resistividade

De forma a verificar o efeito da variação dos parâmetros, em função da resistividade do solo, no problema de localização de falhas, utilizou-se o algoritmo de Johns [25], nos domínios modal, com as grandezas de seqüência positiva, e de fases e

também o algoritmo de Takagi [33]. Para a obtenção dos resultados, procedeu-se da seguinte forma: os parâmetros de entrada foram fornecidos para a resistividade de  $1000 \Omega\text{m}$ , porém os arquivos de entrada de tensão e corrente aplicados aos algoritmos foram simulados para o valor de resistividade de 100 a  $2000 \Omega\text{m}$ . A linha foi considerada perfeitamente transposta, com falta do tipo AT, a 40 km do terminal S, e resistência de falta de 0 ohms.

Na FIG. 5.3, observa-se que o algoritmo de Johns, utilizando seqüência positiva, não sofre os efeitos das variações da resistividade, e os erros obtidos mantêm-se praticamente constantes. No domínio de fases, os resultados do algoritmo apresentam dependência do valor da resistividade.

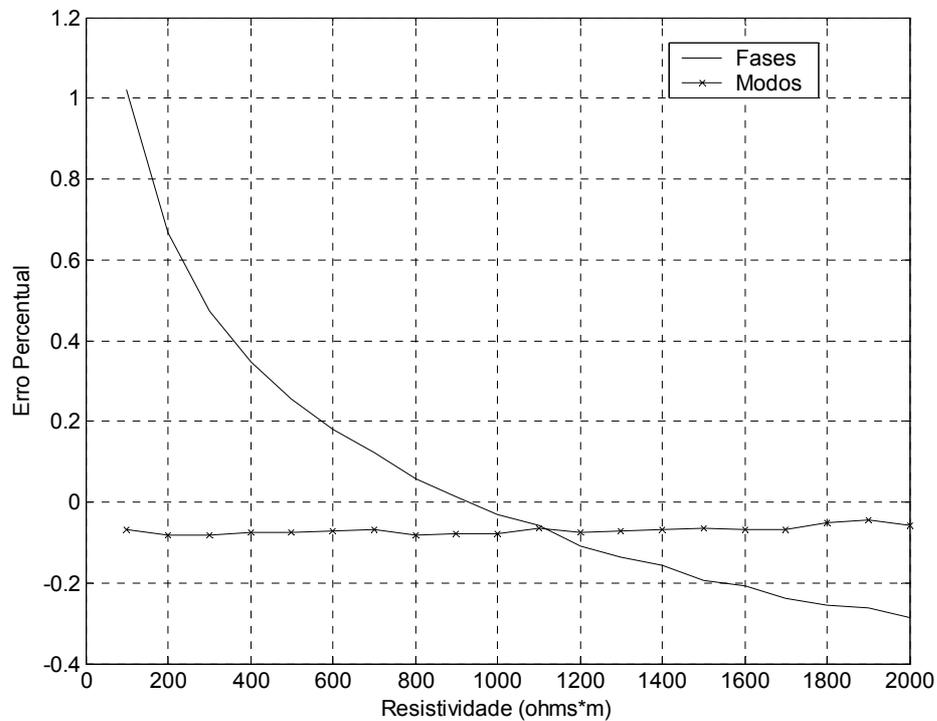


FIGURA 5.3 – Erros em função da variação da resistividade do solo – Algoritmo de Johns

Na FIG. 5.4, têm-se os erros obtidos com o algoritmo de Takagi, que variam com a resistividade do solo. O estudo realizado indica que algoritmos que fazem uso somente do modo aéreo conduz a resultados mais confiáveis, devido às incertezas nos valores assumidos para a resistividade do solo.

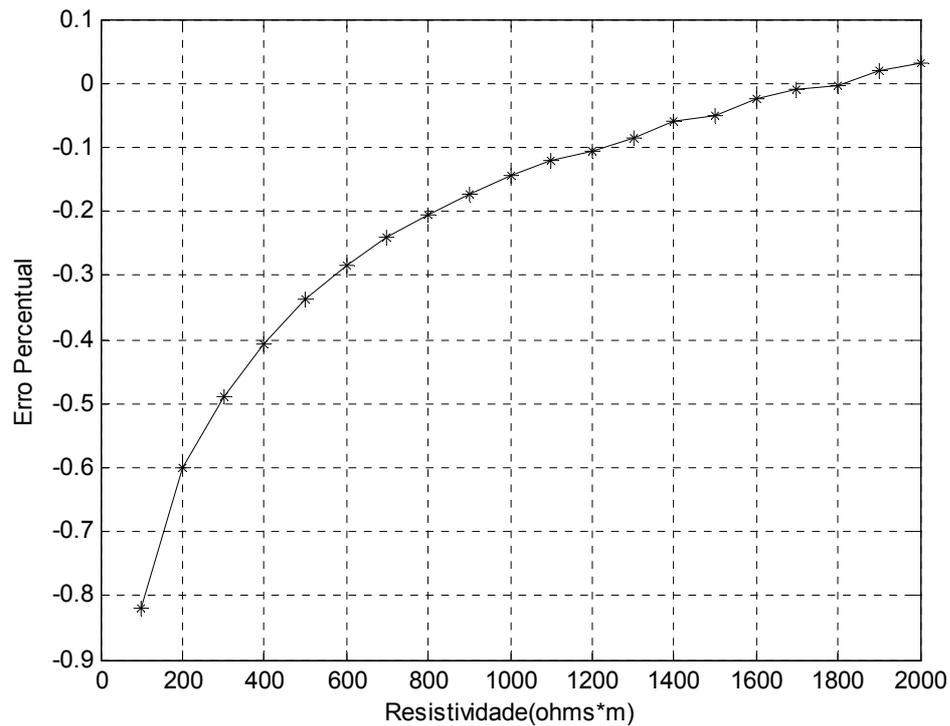


FIGURA 5.4 – Erros em função da variação da resistividade do solo – Algoritmo de Takagi

## 5.2 – A Influência da Transposição

A transposição consiste em rotacionar as posições das fases da linha de transmissão em intervalos, de forma que cada fase percorra todas as posições em uma dada configuração de linha, sendo esta prática indicada para igualar as impedâncias próprias e mútuas. A linha, por exemplo, pode ser dividida em três segmentos, de forma que cada fase ocupe, aproximadamente, 1/3 do comprimento da linha, considerada assim uma transposição completa. Na prática, a transposição de uma linha é feita a partir de uma dada extensão, variando de uma companhia para outra, geralmente, acima de 100 km.

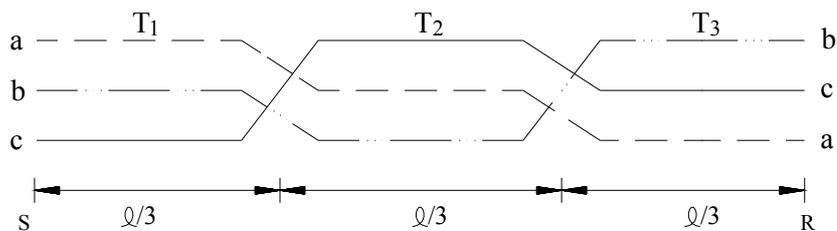


FIGURA 5.5 – Esquema de transposição de uma LT trifásica

Os parâmetros de uma linha de transmissão, normalmente, são utilizados nos algoritmos de localização, supondo-a perfeitamente transposta. Isto significa, para qualquer ponto da linha ao longo da sua extensão, que as matrizes de parâmetros são equilibradas, ou seja, os elementos da diagonal iguais entre si, o mesmo ocorrendo com os elementos fora da diagonal, condição que não pode ser alcançada em circuitos reais. Dessa forma, é interessante a verificação dos efeitos da transposição, nos resultados dos localizadores de falta.

### 5.2.1 – Algoritmo de dois terminais

Nas FIG. 5.6 a 5.9, têm-se os perfis da amplitude e fase dos fasores de tensão de seqüência positiva e modo aéreo 1, calculados a partir das dos terminais local e remoto, nas linhas de transmissão de 138 kV e 345 kV não transpostas, com extensões de 90 km e 400 km respectivamente, para uma falta do tipo AT, a 40 km do terminal local. Foi aplicada a matriz de transformação de Forterscue, para obter a tensão de seqüência positiva, e a matriz de transformação  $[T_V]$ , para determinar a tensão de modo 1.

Observa-se pelas figuras que os pontos de mínimo das curvas, relacionados ao local de falta, são próximos para a linha de 90 km. Já na linha de 400 km, para a fase, não há um mínimo, o que leva a maiores erros de localização.

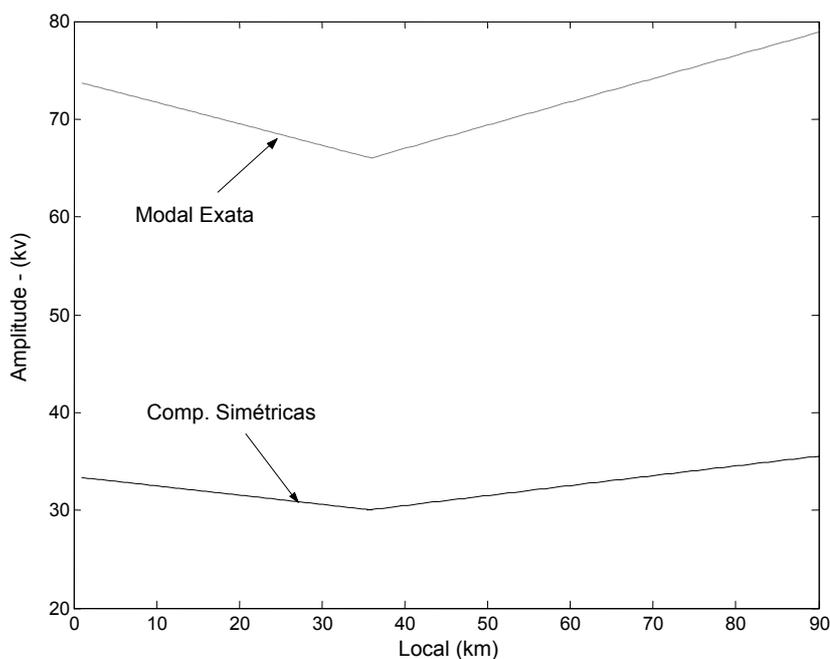


FIGURA 5.6 – Perfil da amplitude dos fasores de tensão na linha não transposta de 138 kV e 90 km

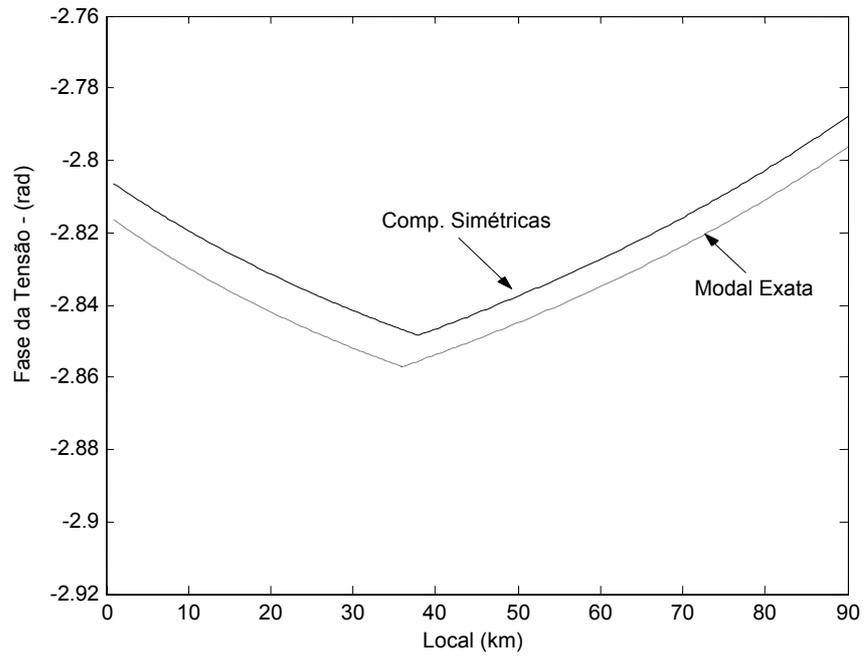


FIGURA 5.7 – Perfil da fase dos fasores de tensão na linha não transposta de 138 kV e 90 km

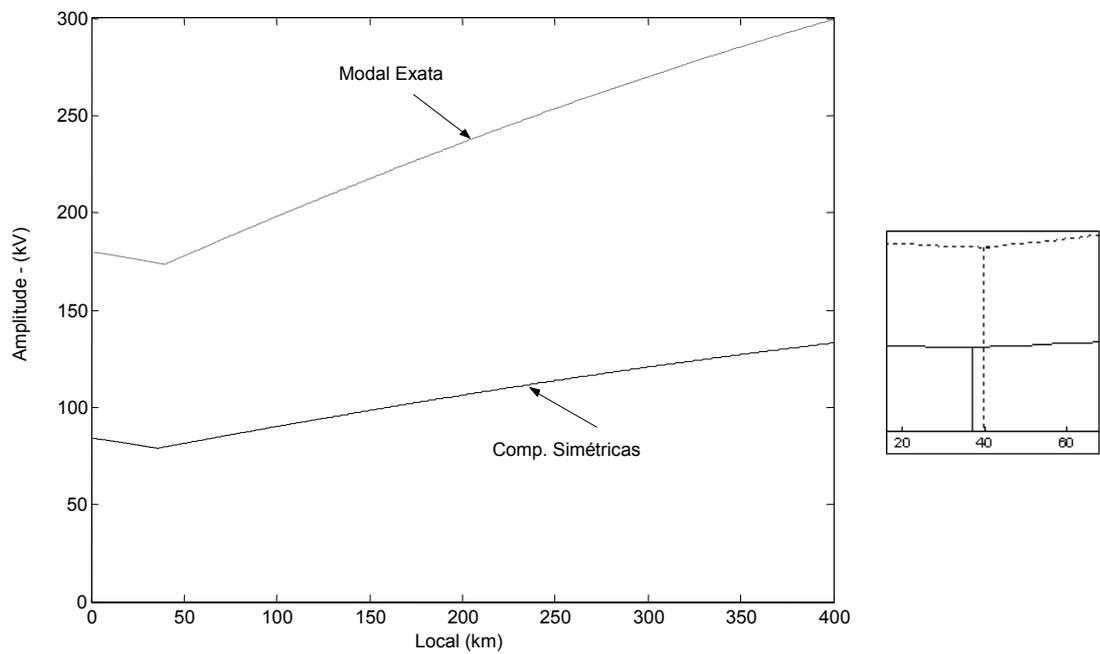


FIGURA 5.8 – Perfil da amplitude dos fasores de tensão na linha não transposta de 345 kV e 400 km

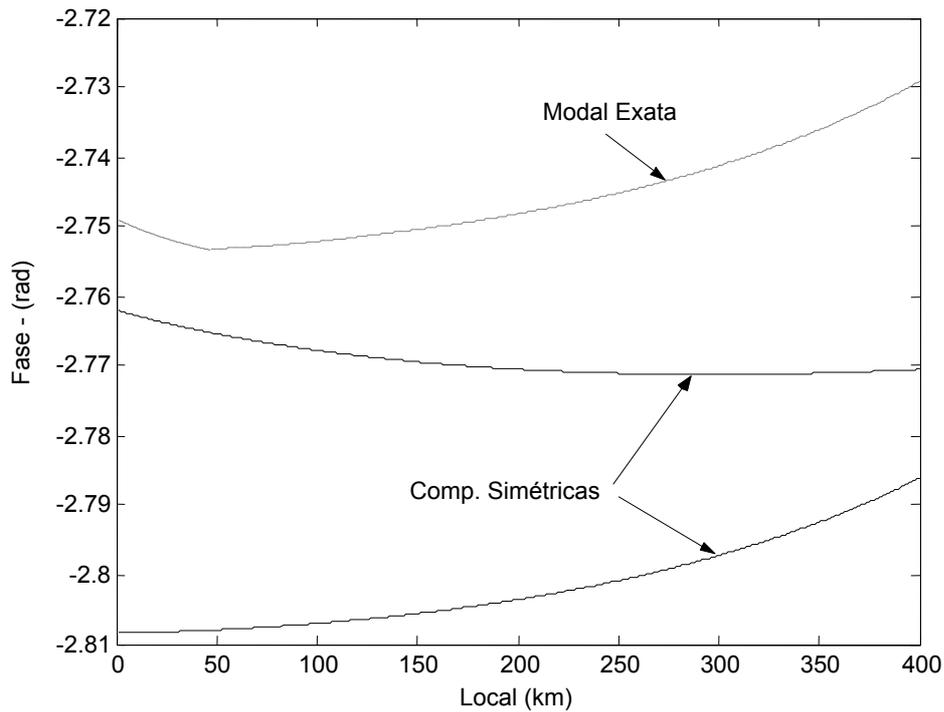


FIGURA 5.9 – Perfil da fase dos fasores de tensão na linha não transposta de 345 kV e 400 km

Para verificar a influência da transposição, aplicaram-se faltas fase-terra, bifásica e trifásica, ao longo das linhas de transmissão de 138 kV e 345 kV. Os resultados são apresentados nos itens seguintes.

### 5.2.1.1 – Linha de 138 kV e 200 km – Algoritmo de Johns

Para a linha simulada como perfeitamente transposta, a solução foi através das grandezas de seqüência positiva, aplicando-se a matriz de Fortescue. Nas simulações da linha como não transposta, na obtenção dos resultados, consideraram-se:

- a – As matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  da linha perfeitamente transposta, e a matriz de transformação aplicada é a de Fortescue (Comp. Sim.);
- b - As matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  da linha não transposta e as matrizes de transformação  $[T_V]$  e  $[T_I]$ , utilizadas para diagonalizar  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$  (NTransposta).

Nas FIG. 5.10(a) a 5.10(f), pode-se notar que não há melhoria significativa na precisão, ao se considerar a linha como não transposta, aplicando-se a matrizes  $[T_V]$  e  $[T_I]$ . Os resultados indicam que, para linhas curtas e médias, o fator transposição não é importante, sob o aspecto de localização de faltas, quando se faz uso do domínio modal.

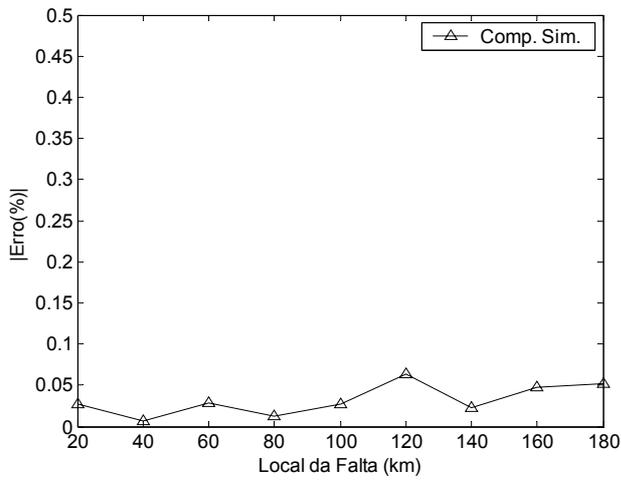


FIGURA 5.10(a) - Linha perf. transposta – Falta AT

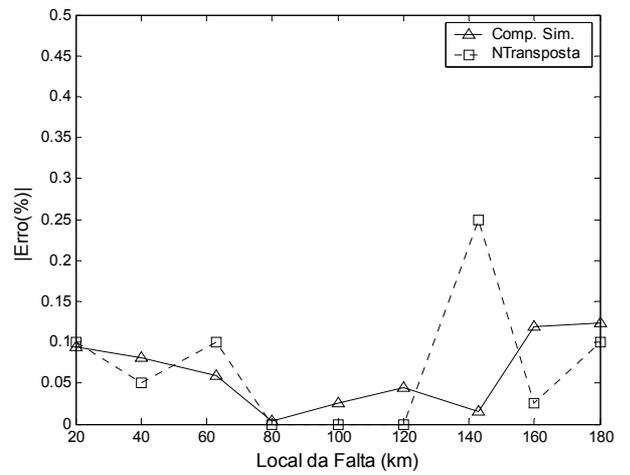


FIGURA 5.10(b) - Linha não transposta – Falta AT

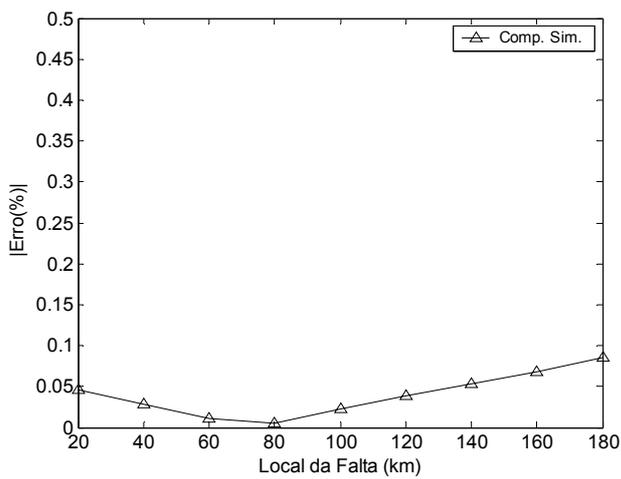


FIGURA 5.10(c) - Linha perf. transposta – Falta BC

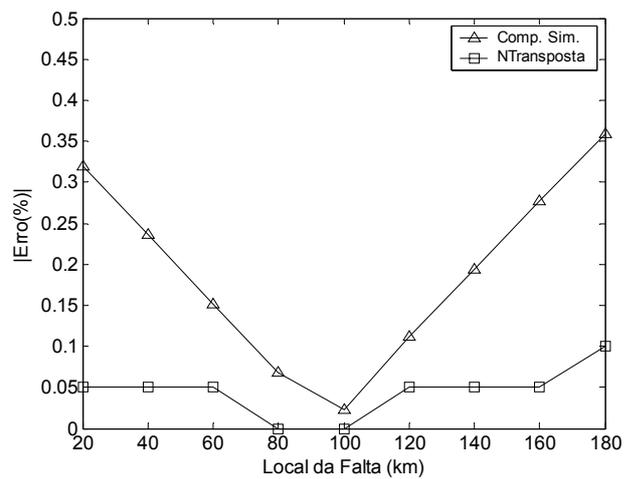


FIGURA 5.10(d) - Linha não transposta – Falta BC

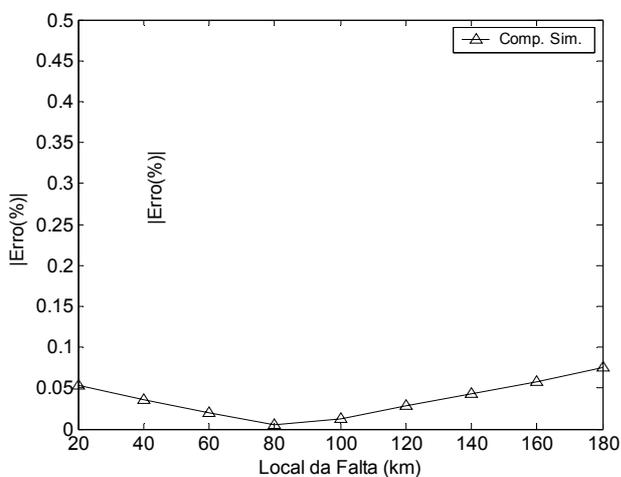


FIGURA 5.10(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC

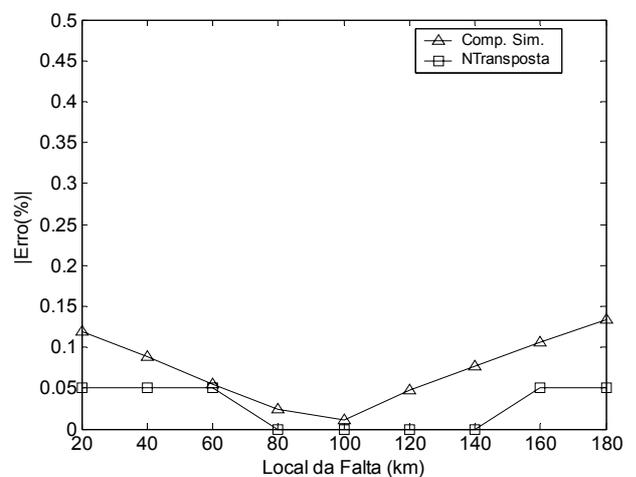


FIGURA 5.10(f) - Linha não transposta – Falta ABC

**5.2.1.2 – Linha de 345 kV e 400 km – Algoritmo de Johns**

A linha foi simulada como perfeitamente transposta e com transposições, conforme indicado na FIG. 5.11, um dos tipos mais utilizados. Para a solução no domínio modal, as matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  são da linha perfeitamente transposta, e a matriz de transformação aplicada é a de Fortescue (Comp. Sim.).

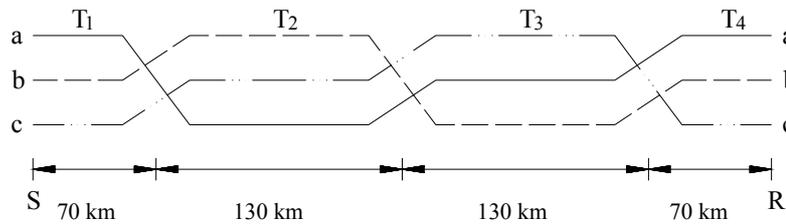


FIGURA 5.11 – Linha de 400 km com transposições

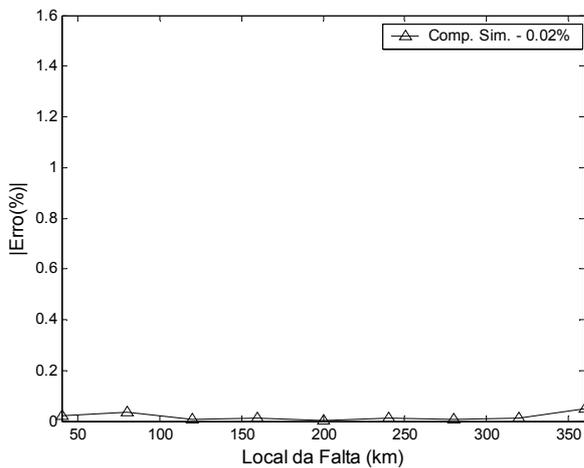


FIGURA 5.12(a) - Linha perf. transposta – Falta AT

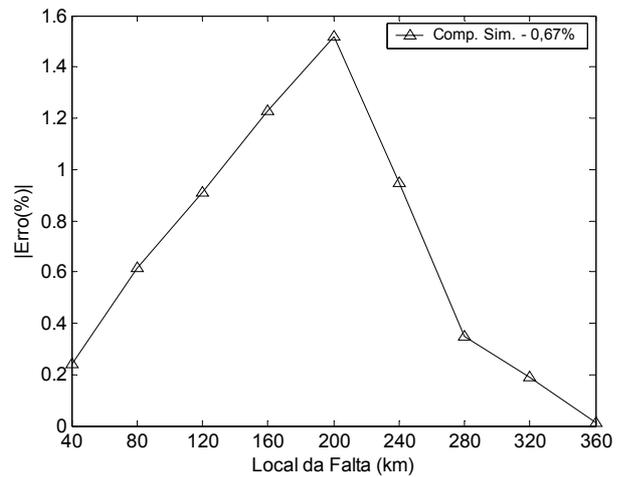


FIGURA 5.12(b) - Linha com transposições – Falta AT

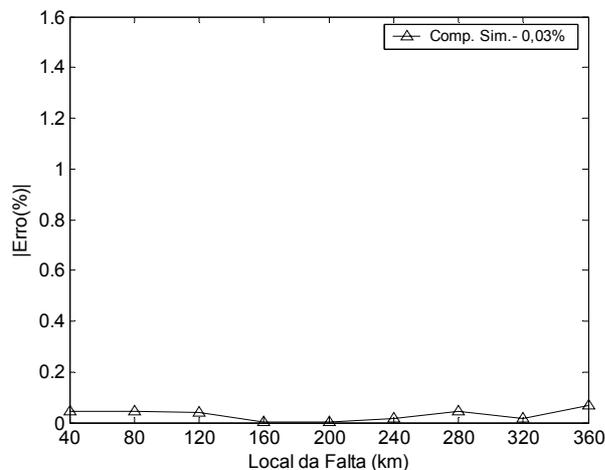


FIGURA 5.12(c) - Linha perf. transposta – Falta BC

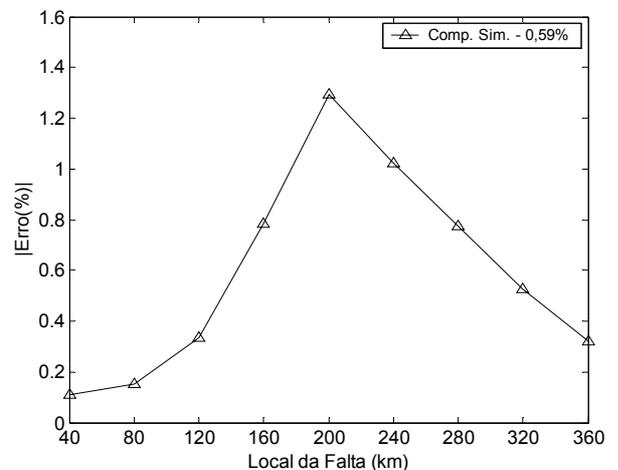


FIGURA 5.12(d) - Linha com transposições – Falta BC

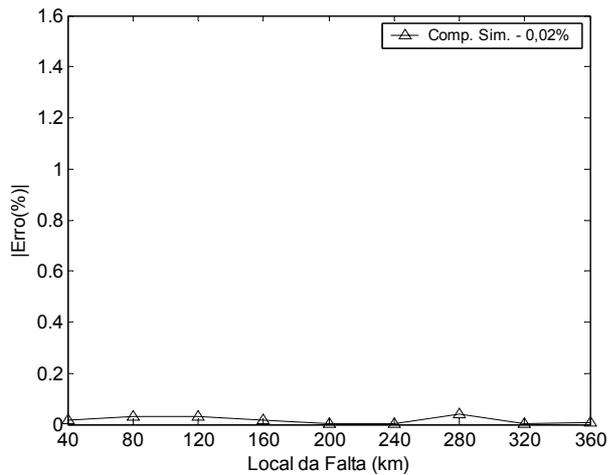


FIGURA 5.12(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC

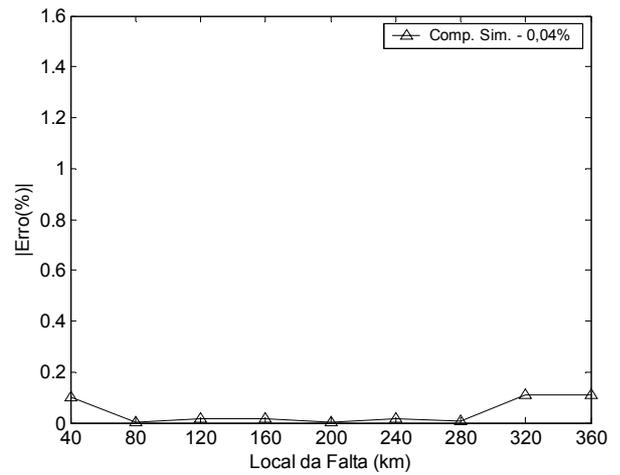


FIGURA 5.12(f) - Linha com transposições – Falta ABC

Observa-se nas FIG. 5.12(a) a 5.12(f), em cuja legenda indica-se a média dos erros, que a solução para a linha com transposições nas faltas fase-terra e fase-fase apresenta um aumento dos erros, à medida que o ponto de falta se aproxima do meio da linha. Isto se deve ao fato de se supor a linha perfeitamente transposta na solução do algoritmo. A seguir, é feita também uma solução no domínio de fases, variando-se a resistividade do solo, comparando os erros com os obtidos no domínio modal.

A linha foi simulada com transposições para as resistividades de 5000, 1000, 500, 100  $\Omega\text{m}$  para falta do tipo AT. Para as resistividades de 5000 e 100  $\Omega\text{m}$ , provocou-se ainda alteração nas alturas dos cabos de +5% e de -5%. Os parâmetros de entrada do algoritmo permaneceram para o valor de 1000  $\Omega\text{m}$  e geometria, conforme anexo.

Na obtenção dos erros, foram consideradas as seguintes soluções para o algoritmo:

- a – No domínio modal, as matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  são para a linha perfeitamente transposta, e a matriz de transformação aplicada é a de Fortescue (Comp. Sim.);
- b - No domínio de fases, as matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  são para a linha perfeitamente transposta (PT);
- c – No domínio de fases, as matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  assumem os valores relativos ao trecho da transposição em que se calcula o valor da tensão (Trecho).

Nas FIG. 5.13(a) a 5.13(d) são apresentados os erros com as variações na resistividade, sem a variação na altura dos condutores. Na TAB. 5.1, têm-se os erros médios em função da resistividade e altura dos cabos e, na FIG. 5.14, o gráfico.

Verifica-se que, para a solução no domínio modal, os erros mantiveram-se praticamente inalterados. Em relação às duas soluções no domínio de fases (PT e por trechos), os erros obtidos foram semelhantes, não se definindo, desta maneira, qual delas é melhor, sendo, portanto, equivalentes. Um fato importante é que, para este tipo de transposição, a solução no domínio modal não se mostra superior ao domínio de fases, mesmo com as alterações na resistividade e na altura dos cabos. Na verdade, olhando-se somente os resultados destas simulações, a solução no domínio de fases mostra-se um pouco superior.

Para se ter um melhor direcionamento em uma aplicação prática da forma mais indicada de resolver o problema da localização de falhas, ou seja, utilizar os domínios de fases ou modal, o algoritmo de Johns, nas duas versões, será aplicado mais à frente, neste capítulo, a alguns casos reais.

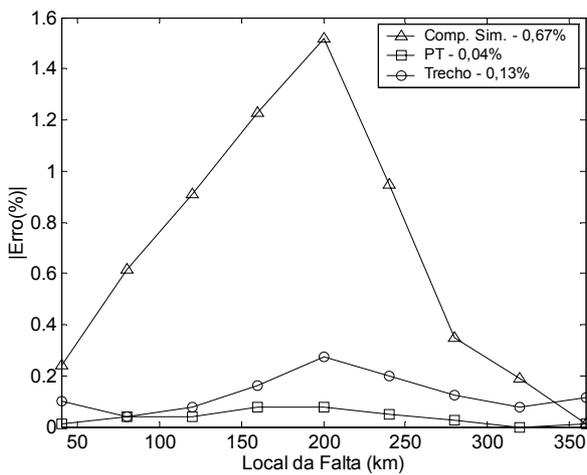


FIGURA 5.13(a) - Linha com transposições –  $\rho = 1000 \Omega m$

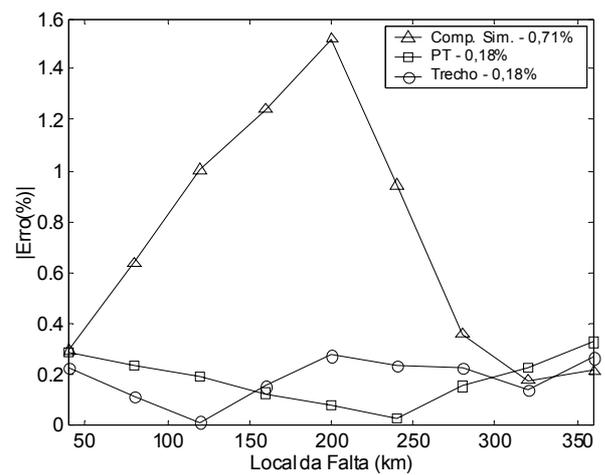


FIGURA 5.13(b) - Linha com transposições –  $\rho = 500 \Omega m$

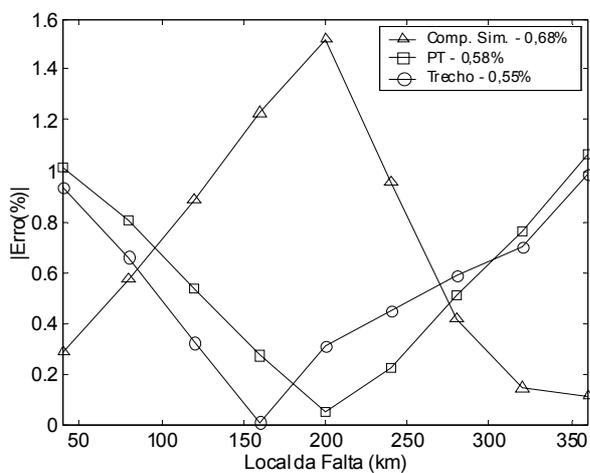


FIGURA 5.13(c) - Linha com transposições –  $\rho = 100 \Omega m$

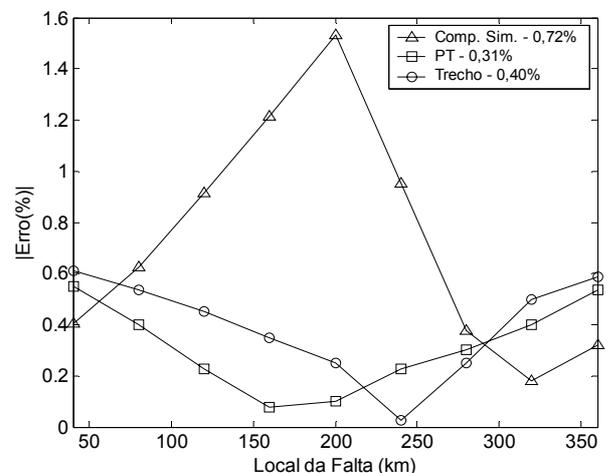


FIGURA 5.13(d) - Linha com transposições  $\rho = 5000 \Omega m$

TABELA 5.1 – Erro médio percentual nas localizações para variações na resistividade e altura dos condutores - linha de 400 km

Caso	Resistividade ( $\Omega$ km)	Variação da altura (%)	Erro Médio (%) <sup>(1)</sup>		
			Johns (Comp. Sim.)	Johns (PT)	Johns (Trecho)
1	1000	0	0,67	0,04	0,13
2	500	0	0,71	0,18	0,18
3	100	0	0,68	0,58	0,55
4	100	+5	0,64	0,49	0,47
5	100	-5	0,71	0,70	0,64
6	5000	0	0,72	0,31	0,40
7	5000	+5	0,66	0,41	0,49
8	5000	-5	0,76	0,22	0,30

(1) Considerando o módulo dos erros

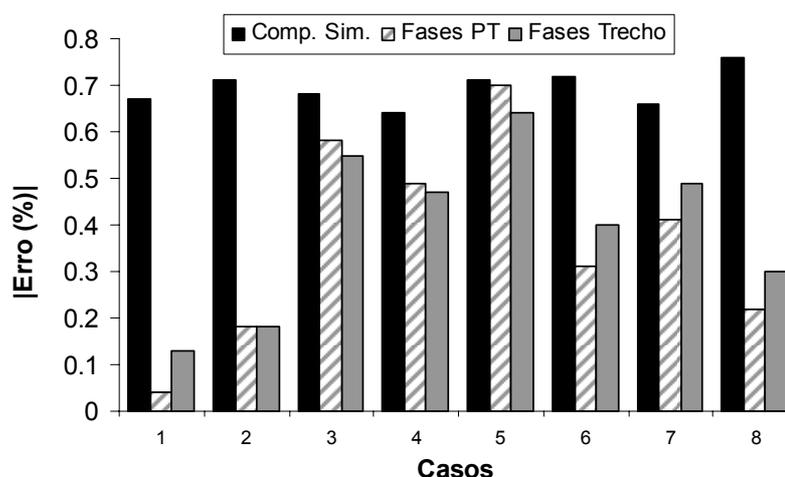


FIGURA 5.14 – Erros médios percentuais para linha com transposições

## 5.2.2 – Algoritmo de um terminal

### 5.2.2.1 – Linha de 138 kV e 200 km – Algoritmo de Takagi

O algoritmo de Takagi foi aplicado à linha, simulada como perfeitamente transposta e não transposta, para resistência de falta de 0 ohms, e os resultados são apresentados nas FIG. 5.15(a) a 5.15(f). Observa-se que, para a linha perfeitamente transposta, têm-se erros reduzidos, o que não ocorre para as faltas fase-terra e fase-fase

com a não-transposição, em que os erros aumentaram muito, atingindo quase 5%, próximo ao final da linha, para a falta BC.

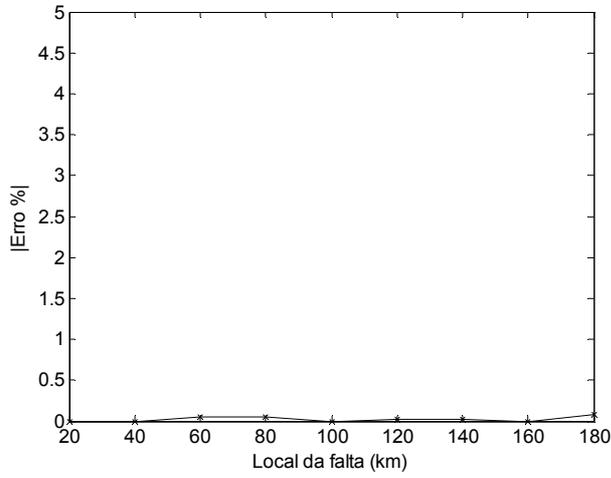


FIGURA 5.15(a) - Linha perf. transposta – Falta AT

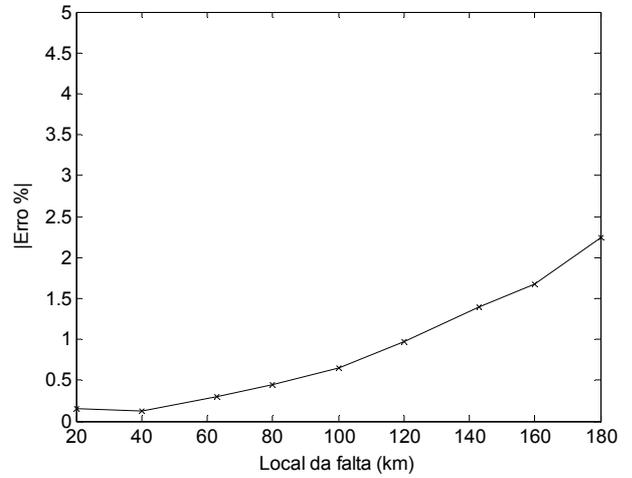


FIGURA 5.15(b) - Linha não transposta – Falta AT

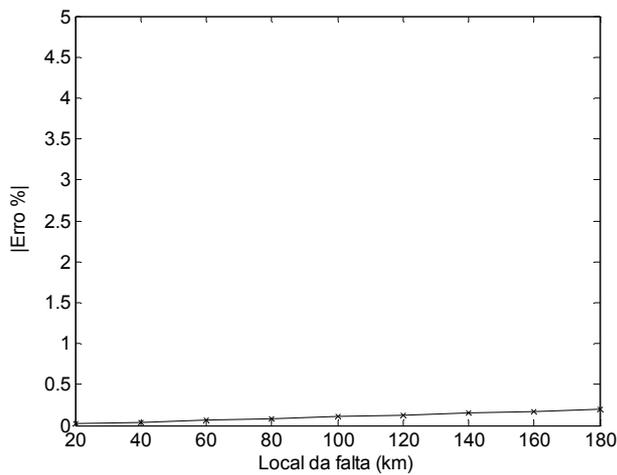


FIGURA 5.15(c) - Linha perf. transposta – Falta BC

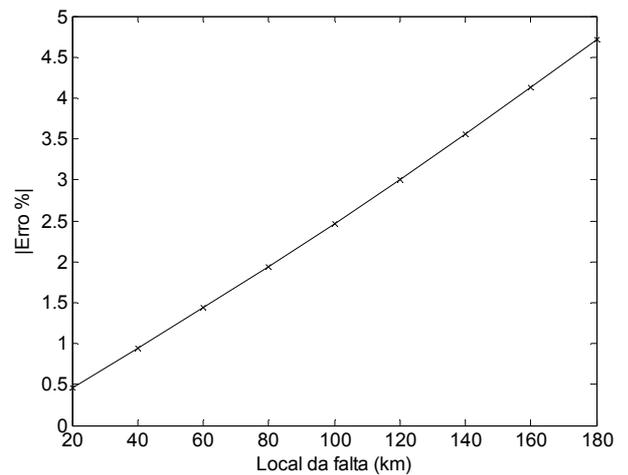


FIGURA 5.15(d) - Linha não transposta – Falta BC

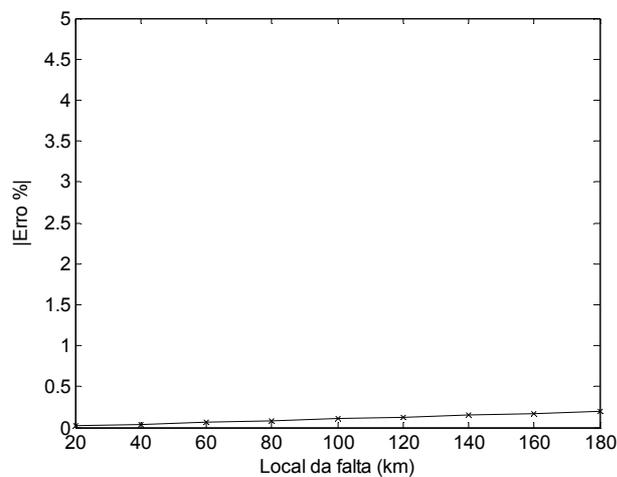


FIGURA 5.15(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC

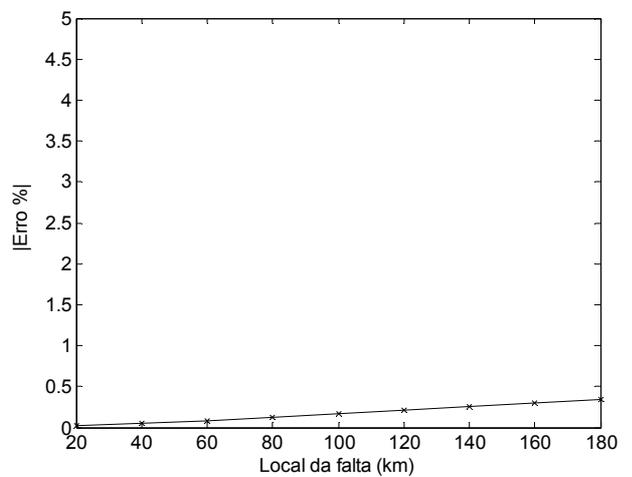


FIGURA 5.15(f) - Linha não transposta – Falta ABC

**5.2.2.2 – Linha de 345 kV e 400 km – Algoritmo de Takagi**

O algoritmo de Takagi foi aplicado na linha de 400 km com transposições, para resistência de falta de 0 ohms e os resultados são mostrados na FIG. 5.16(a) a 5.16(f). Os erros obtidos são reduzidos, exceto para a falta fase-fase no meio da linha, onde chegou a atingir quase 2,5%.

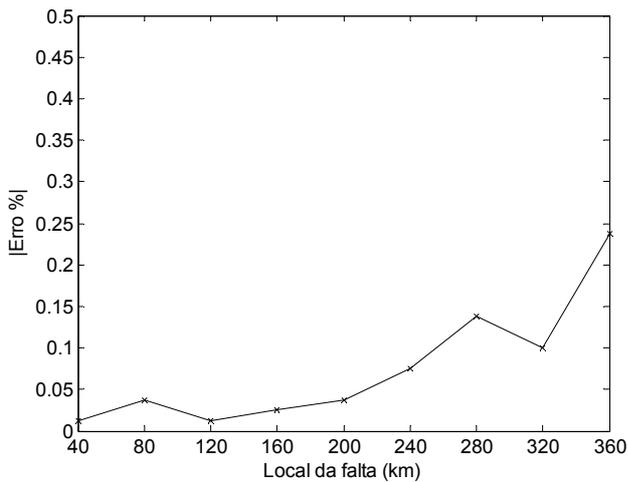


FIGURA 5.16(a) - Linha perf. transposta – Falta AT

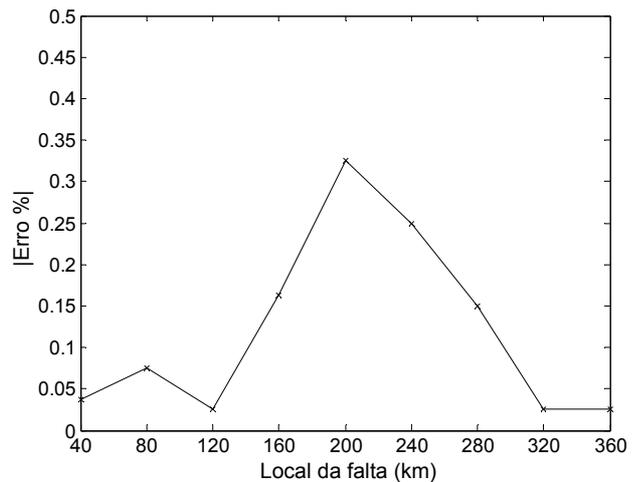


FIGURA 5.16(b) - Linha com transposições – Falta AT

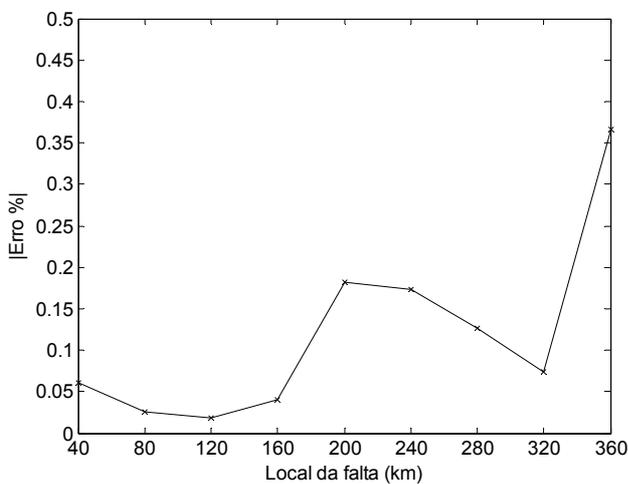


FIGURA 5.16(c) - Linha perf. transposta – Falta BC

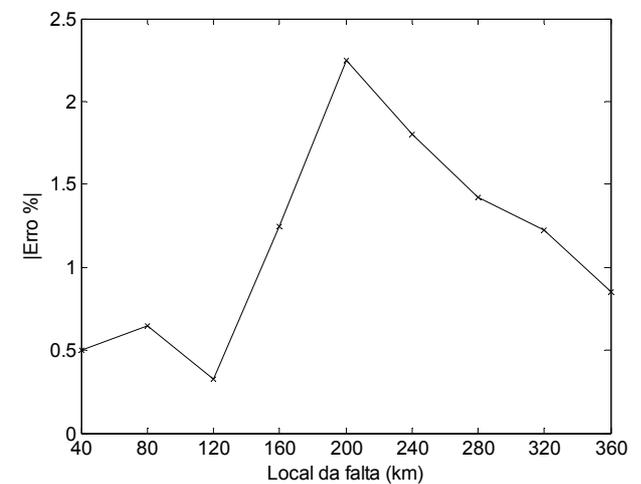


FIGURA 5.16(d) - Linha com transposições – Falta BC

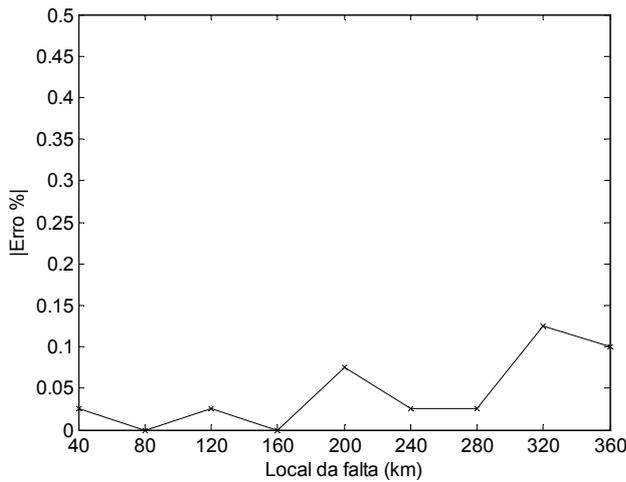


FIGURA 5.16(e) - Linha perf. transposta – Falta ABC

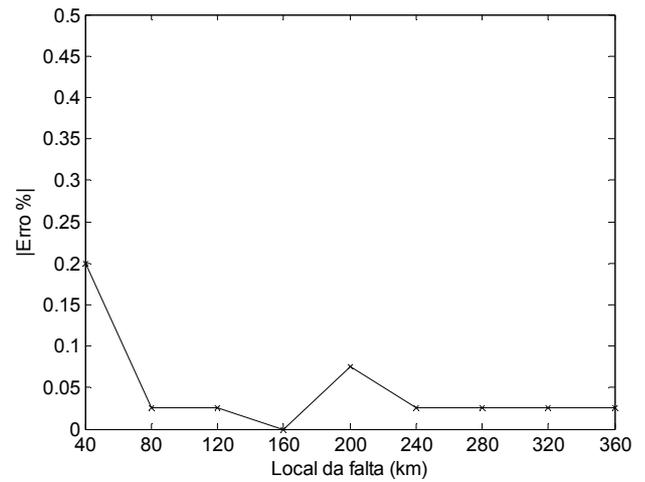


FIGURA 5.16(f) - Linha com transposições – Falta ABC

### 5.3 – A Influência dos Transformadores de Corrente e Potencial

Idealmente, o objetivo dos transformadores de proteção é fornecer uma grandeza secundária em fase com a primária e as amplitudes primária e secundária relacionadas, exatamente, pela relação de transformação. Na realidade, ocorre que, devido às características construtivas do núcleo, existem erros de fase e amplitude entre as grandezas primárias e secundárias, que se refletem nos localizadores de falta. Dependendo do valor da corrente de falta e da carga total ligada ao secundário, pode haver ainda saturação do núcleo do TC.

Na TAB. 5.2, mostram-se algumas variações na amplitude e fase a que foram submetidos os fasores estimados de uma falta AT, para a linha de 345 kV e 400 km com transposições e, nas FIG. 5.17(a) a 5.17(d), têm-se os erros apresentados pelo algoritmo de Johns. Foram utilizadas as formulações modal e de fases, e os dados de entrada do algoritmo são para a linha perfeitamente transposta. Observa-se que, nos casos 1 e 2, houve um aumento médio dos erros, se comparados com a FIG. 5.13(a).

TABELA 5.2 – Variações na amplitude e na fase dos fasores de entrada do algoritmo de localização

Caso	Amplitude (%)				Fase (graus)			
	[V <sub>S</sub> ]	[I <sub>S</sub> ]	[V <sub>R</sub> ]	[I <sub>R</sub> ]	[V <sub>S</sub> ]	[I <sub>S</sub> ]	[V <sub>R</sub> ]	[I <sub>R</sub> ]
1	+0,5	+1	-0,5	-1	+1	+2	-1	-2
2	-0,5	-1	+0,5	+1	-1	-2	+1	+2
3	+0,5	-1	+0,5	-1	+1	-2	+1	-2
4	-0,5	+1	-0,5	+1	-1	+2	-1	+2

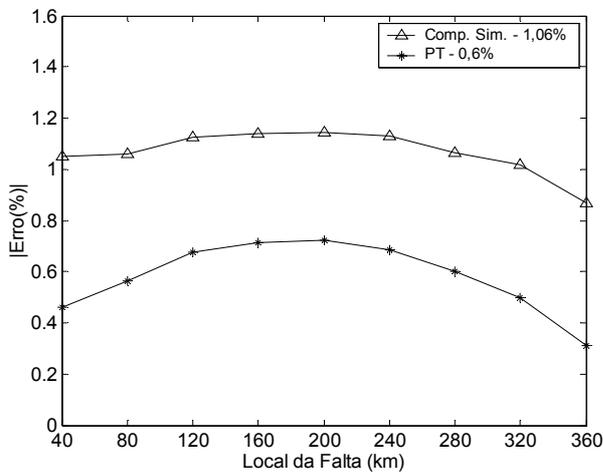


FIGURA 5.17(a) – Caso 1 – Tabela 5.2

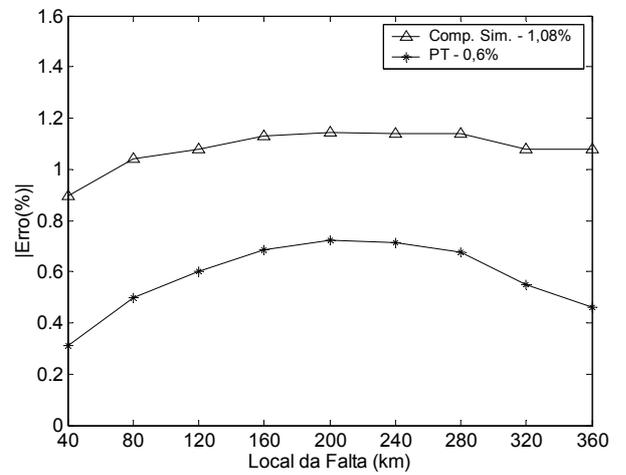


FIGURA 5.17(b) – Caso 2 – Tabela 5.2

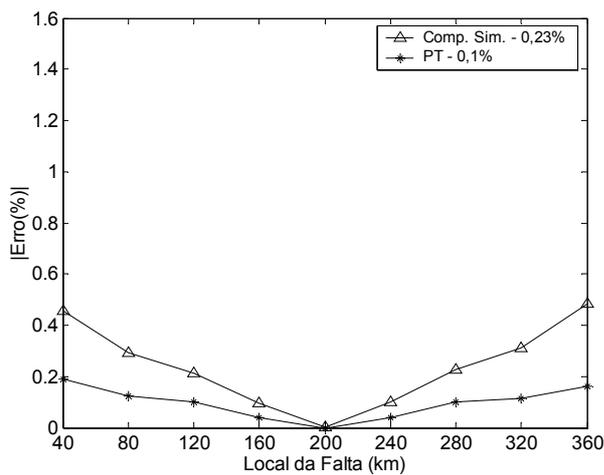


FIGURA 5.17(c) – Caso 3 – Tabela 5.2

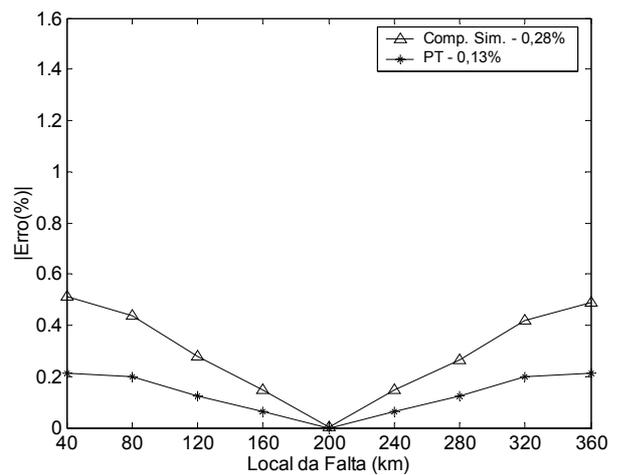


FIGURA 5.17(d) – Caso 4 – Tabela 5.2

### 5.4 - A Influência da Sincronização de Dados

A sincronização dos dados locais e remotos no tempo é um pressuposto importante na maioria dos algoritmos que utilizam dois terminais para fazer a localização da falta. Ocorre que pode haver erros nos equipamentos de oscilografia ou perda no sinal de GPS e os dados serem registrados de forma não sincronizada. Nas FIG. 5.18(a) a 5.18(d), mostram-se os erros do algoritmo de Johns, na formulação modal e em fases para a linha de 400 km com transposições para faltas AT. À medida que aumentam os erros de sincronismo, pioram os resultados da localização, sendo a formulação no domínio de fases mais sensível que a modal. Os erros apresentaram grande variação em torno do valor médio, para as FIG. 5.18(c) e 5.18(d), o que diminui a confiança no localizador, assim como a sua robustez nestas condições.

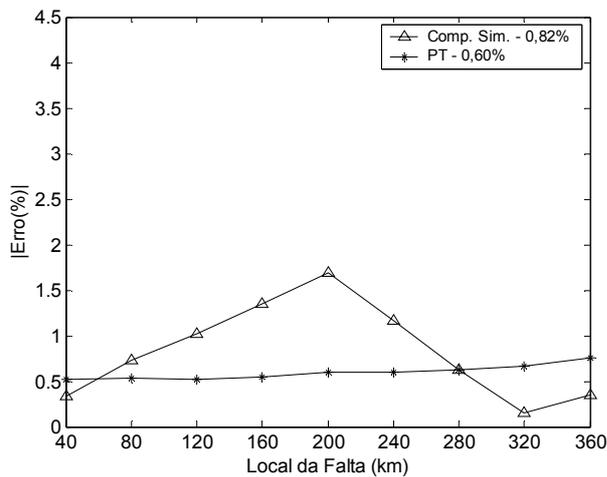


FIGURA 5.18(a) – Erros de sincronização – 5 graus

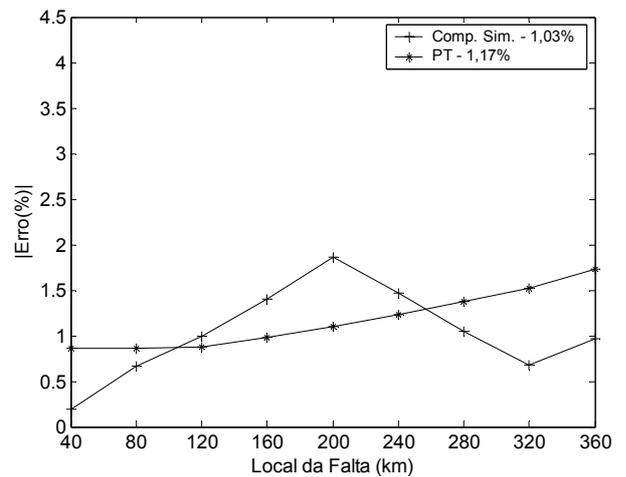


FIGURA 5.18(b) – Erros de sincronização – 10 graus

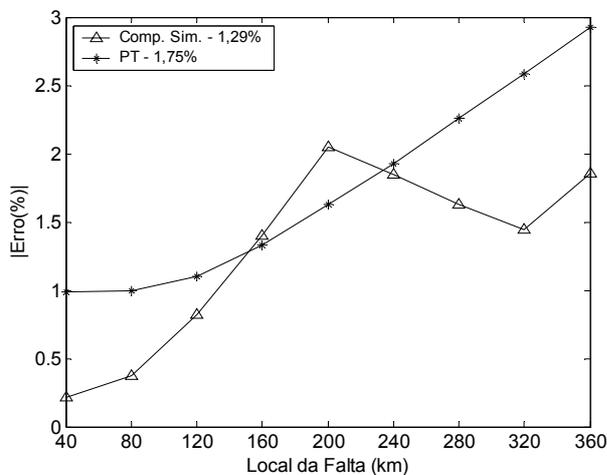


FIGURA 5.18(c) – Erros de sincronização – 15 graus

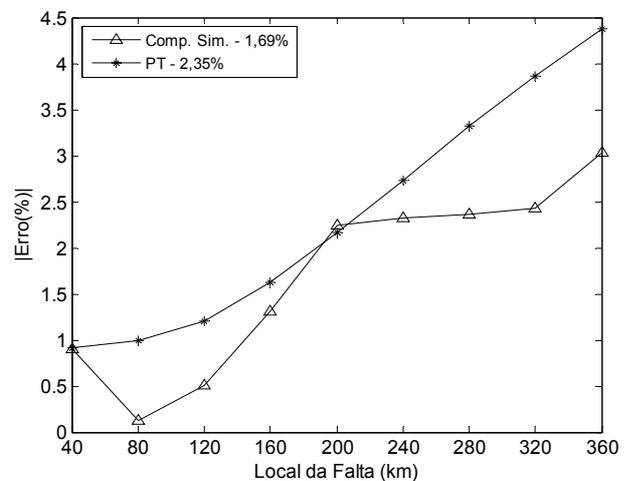


FIGURA 5.18(d) – Erros de sincronização – 20 graus

## 5.5 - A Influência da Detecção da Falta

Em casos reais de curto-circuito, pode haver dificuldade em identificar o instante de início da falta nas ondas de entrada para localizadores de dois terminais. Quando os dados não estão sincronizados, a detecção deste instante por parte do usuário pode acarretar maiores erros de localização. Considere o exemplo das FIG. 5.19(a) e 5.19(b), em que a sincronização dos dados foi feita com as grandezas de seqüência positiva, conforme descrito em [16]. As ondas de corrente consistem de uma falta real AT, ocorrida no quilômetro 127, a partir do terminal local, em uma linha de 356,3 km. Nas ondas do terminal emissor, consideraram-se dois locais como de provável início da falta, e, no terminal receptor, três locais. Na TAB. 5.3, têm-se os resultados encontrados pelo algoritmo de Johns, de acordo com as posições dos cursores. Percebe-se uma variação considerável do local da falta, em função da detecção, devido à dificuldade de fazê-la corretamente ou até mesmo à falta de prática do engenheiro, nesta atividade.

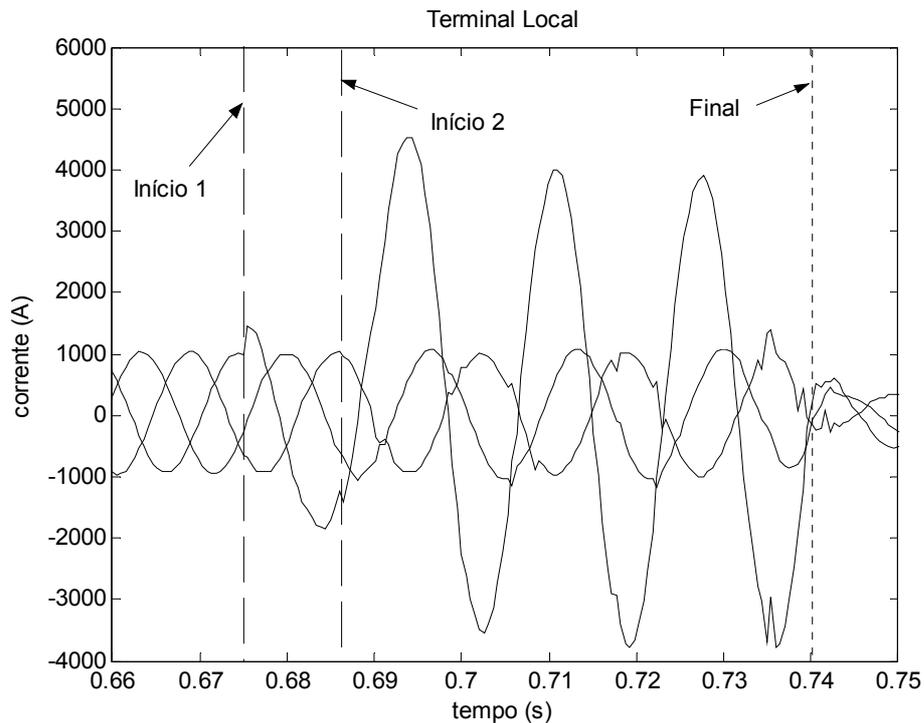


FIGURA 5.19(a) – Detecção de uma falta AT real no terminal local

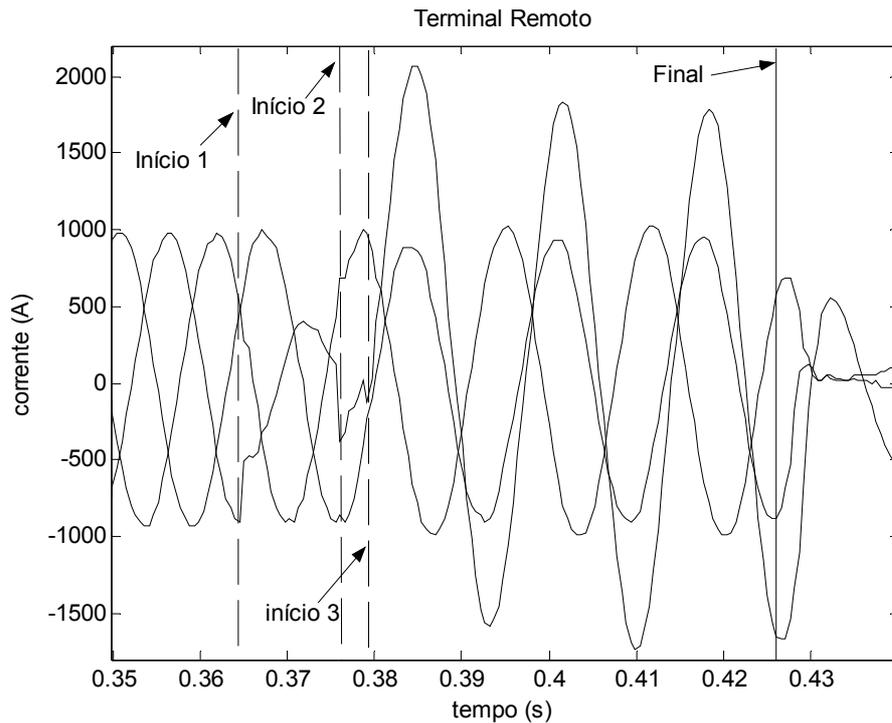


FIGURA 5.19 (b) – Detecção de uma falta AT real no terminal remoto

TABELA 5.3 – Erros de localização em função da detecção da falta

Posição do cursor – FIG. 5.19(a) e (b)		Local estimado (km)	Erro (%)
Início terminal	Início terminal		
1	1	134,9	2,22
2	2	135,6	2,41
2	3	129,1	0,59

## 5.6 - A Influência da Resistência de Falta

A resistência de falta é uma das maiores fontes de erros em localizadores de um terminal. Devido ao fato de não terem informações do terminal remoto, a maioria dos algoritmos adotam simplificações no equacionamento, que conduzem a erros.

Considere o circuito em falta da FIG. 3.1(c). A tensão medida do terminal S é dada por

$$V_S = xZ_L I_S + R_F I_F \tag{5.4}$$

A impedância medida do terminal S pode ser encontrada dividindo a equação (5.4) pela corrente medida  $I_S$ .

$$Z_S = \frac{V_S}{I_S} = xZ_L + R_F \frac{I_F}{I_S} \quad (5.5)$$

onde  $Z_S$  é a impedância aparente medida do terminal S. Se a razão da corrente de falta  $I_F$  pela corrente do terminal local  $I_S$  é um número complexo, a resistência de falta pode ser representada como uma impedância com uma componente reativa. A componente reativa pode ser indutiva ou capacitiva, dependendo do ângulo resultante da razão entre as duas correntes, produzindo um erro na localização de falta. Se a corrente injetada do terminal remoto  $I_R$  estiver em fase com a corrente local, a componente reativa será zero.

De forma a analisar os efeitos do ângulo de  $I_F/I_S$ , a superposição pode ser utilizada, separando as correntes pré-falta  $I'_S$  e de falta  $I_S$  [49]. A corrente superposta é  $I''_S$ , e a equação (5.5) pode ser reescrita

$$Z_S = \frac{V_S}{I_S} = xZ_L + R_F \frac{I}{d_s n_s} \quad (5.6)$$

onde  $d_s$  é o fator de distribuição de corrente e  $n_s$  é o fator de carga do circuito.

$$d_s = \frac{\Delta I_S}{I_F} = \frac{Z_{RR} + (\ell - x)Z_L}{Z_{RR} + \ell Z_L + Z_{SS}} = |d_s| \angle \beta \quad (5.7)$$

$$n_s = \frac{I_S}{I_S - I'_S} = \frac{I_S}{I''_S} = |n_s| \angle \gamma \quad (5.8)$$

Assim, a componente reativa da impedância de falta depende de dois fatores. O fator de distribuição de corrente  $d_s$  é determinado pelas impedâncias do sistema. Se o sistema é homogêneo, o ângulo  $\beta$  de  $d_s$  é zero. Se há fluxo de carga no sistema, o ângulo  $\gamma$  de  $n_s$  não será zero. Se a magnitude da corrente de falta  $I_S$  é muito maior que a da corrente de carga  $I'_S$ , o ângulo  $\gamma$  será próximo de zero. A soma dos ângulos determina o valor da componente reativa.

Na FIG. 5.20 tem-se a variação do ângulo do fator de distribuição de corrente da linha de 138 kV, utilizando o modelo RL série, em função da capacidade de curto-circuito das fontes, definida como SIR, dado por

$$SIR = \left| \frac{Z_{SS}}{Z_{RR}} \right| \quad (5.9)$$

Um baixo valor de SIR significa que as medidas são feitas no terminal da linha de transmissão, onde está a fonte com maior capacidade de curto-circuito. Observa-se que o maior SIR proporcionará um maior efeito da resistência de falta no resultado do localizador de falta.

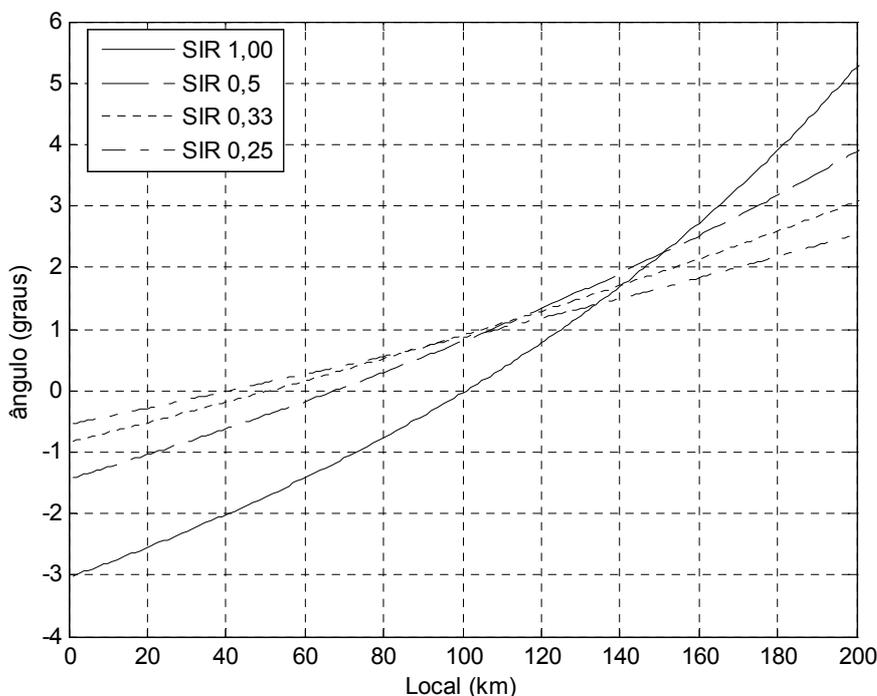


FIGURA 5.20 – Influência da capacidade de curto-circuito das fontes no fator de distribuição de corrente

Por não serem as impedâncias do sistema conhecidas com precisão, no momento da falta, alguns algoritmos não consideram seus efeitos na formulação, supondo que as correntes de contribuição no ponto de falta têm a mesma fase, adotando uma simplificação. Em relação ao fluxo de carga, alguns algoritmos possuem formas de reduzir seu efeito combinado com a resistência de falta, o que produz erros de localização.

A seguir, submeteu-se o algoritmo de Takagi a faltas AT, conforme TAB. 5.4, para verificar a influência da resistência de falta em seus resultados. No caso 3, variou-se a

razão R/X das impedâncias da fonte, mas foi mantido o módulo dos casos anteriores. Na FIG. 5.21, têm-se os resultados.

TABELA 5.4 – Erros de localização em função da resistência de falta

Caso	$R_F$	R/X da fonte local (%)		R/X fonte remota (%)	
		Positiva	Zero	Positiva	Zero
1	0	0,5	0,5	0,5	0,5
2	30	0,5	0,5	0,5	0,5
3	30	0,5	0,5	15,0	15,0

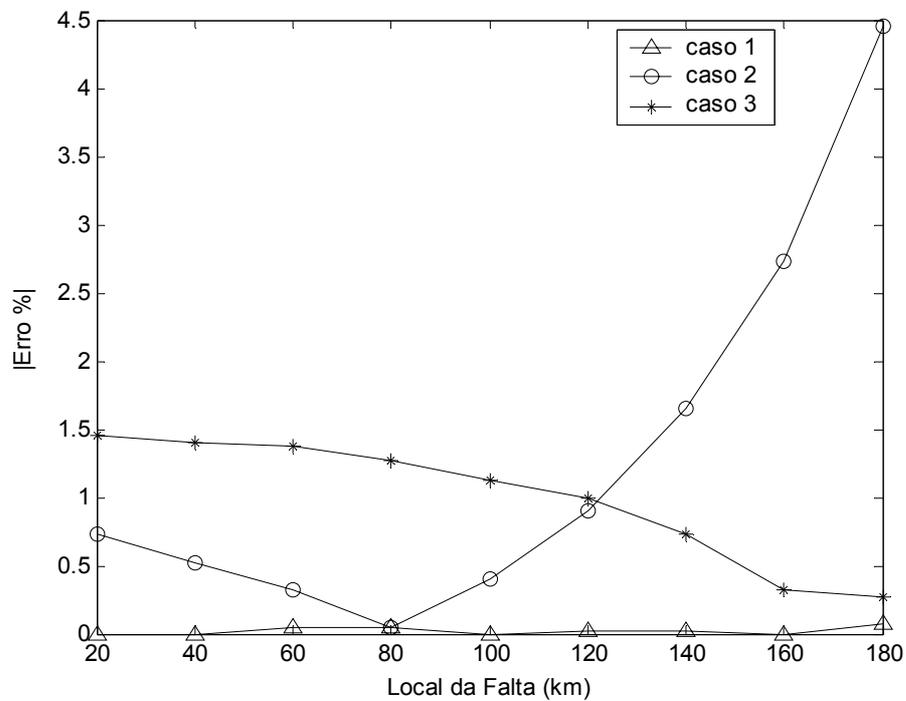


FIGURA 5.21 – Erros devido à resistência de falta

Os erros aumentaram bastante para a resistência de falta de 30 ohms, no caso 2. No caso 3, a variação da fase das impedâncias da fonte remota altera o fator de distribuição de corrente, mudando o perfil dos erros obtidos para o caso 2.

## 5.7 – Aplicação em Casos Reais de Curto-Circuito

Os algoritmos de Johns e Takagi foram aplicados a alguns casos reais de faltas do sistema elétrico brasileiro, de forma a verificar a influência das fontes de erro no resultado final dos localizadores em situações práticas. O registro foi feito através de registradores com frequência de amostragem de 1920 Hz, nos dois terminais da linha de transmissão, não estando os dados sincronizados. As distâncias de ocorrência foram confirmadas pelas equipes de manutenção da concessionária, de forma a se comparar com os resultados apresentados. As linhas possuem transposição, porém não há informações da geometria. Os valores dos parâmetros das linhas fornecidos pela concessionária são os de seqüência zero e positiva, supondo-as perfeitamente transpostas.

### 5.7.1 – Algoritmo de Johns

Após a sincronização de dados, conforme item 4.7, considerando a linha perfeitamente transposta, aplicou-se o algoritmo nos domínios

- Modal, com as grandezas de seqüência positiva obtidas com a matriz de Fortescue;
- De fases, com as matrizes de parâmetros da linha balanceada;
- Modal, com as grandezas de seqüência zero obtidas da matriz de Fortescue. Esta forma de localização é apenas para que se tenha uma idéia real dos efeitos das aproximações no cálculo dos parâmetros de seqüência zero, na localização de falta.

Nos resultados das TAB. 5.5 e 5.6, assim como no gráfico da FIG. 5.22, observa-se um melhor desempenho do domínio modal com as grandezas de seqüência positiva, seguido da localização através do domínio de fases. A localização pelo método de Johns com a seqüência zero apresentou o maior erro médio, mostrando uma maior imprecisão dos parâmetros. Se, para os dados simulados, os domínios modal com seqüência positiva e de fases concorriam pelos melhores resultados, quando foram aplicados a casos práticos, houve um melhor desempenho do primeiro, indicando, nestes testes, ser mais adequado à localização de faltas.

TABELA 5.5 – Localização de faltas reais – Algoritmo de Johns

LT	Tensão Nominal (kV)	Extensão (km)	Falta	Local (km)	Local Estimado (km)		
					Johns (Seq. +)	Johns (Fases)	Johns (Seq. 0)
1	345	74,4	AT	60,0	64,4	65,6	66,5
			BT	54,0	54,3	56,4	56,3
2	500	105,6	AT	30,0	29,9	27,1	27,3
3	500	356,3	AT	127,0	130,0	120,2	121,0
4	500	342,7	CT	317,0	324,0	319,4	318,0
			AT	76,0	83,5	88,0	90,6
			CT	55,0	56,8	60,6	61,4
5	500	248,4	AT	223,0	233,0	235,7	237,0
			ACT	157,0	154,0	157,6	163,0
6	500	219,2	BT	218,0	216,0	217,8	218,0

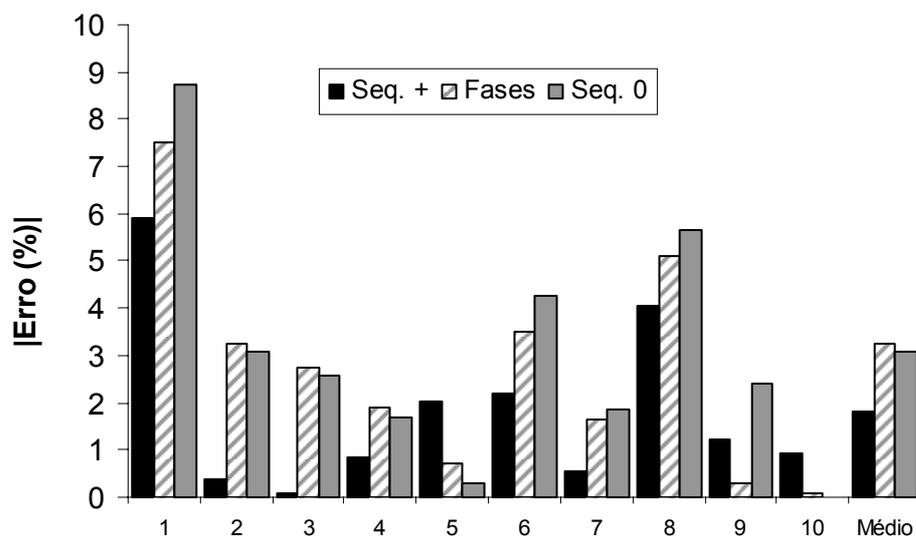


FIGURA 5.22 – Erros percentuais – Caso reais – Algoritmo de Johns

TABELA 5.6 – Localização de faltas reais – Erros Percentuais– Algoritmo de Johns

LT	Tensão Nominal (kV)	Extensão (km)	Falta	Local (km)	Erro (%)		
					Johns (Seq. +)	Johns (Fases)	Johns (Seq. 0)
1	345	74,4	AT	60,0	5,91	7,53	8,74
			BT	54,0	0,40	3,23	3,09
2	500	105,6	AT	30,0	-0,09	-2,74	-2,56
3	500	356,3	AT	127,0	0,84	-1,91	-1,68
4	500	342,7	CT	317,0	2,04	0,70	0,29
			AT	76,0	2,19	3,50	4,26
			CT	55,0	0,53	1,64	1,87
5	500	248,4	AT	223,0	4,03	5,11	5,64
			ACT	157,0	-1,21	0,29	2,42
6	500	219,2	BT	218,0	0,91	-0,09	0,00
Erro Médio <sup>(1)</sup>					1,82	2,67	3,06

(2) Considerando o módulo dos erros

### 5.7.2 – Algoritmo de Takagi

O algoritmo de Takagi foi aplicado aos casos reais de faltas, supondo a linha perfeitamente transposta. Na TAB. 5.7, estão os resultados alcançados a partir dos dois terminais, já que estavam disponíveis, oferecendo possibilidade de comparação.

Observa-se na TAB. 5.7 e 5.8, assim como no gráfico da FIG. 5.23, que para cada caso, um dos resultados, com dados locais ou remotos, teve boa precisão. Este é um dos problemas do algoritmo de um terminal, pois havendo, na prática, apenas um lado da linha disponível para coletar os dados, pode ser que seja o que irá possibilitar a menor precisão nos resultados. Caso exista uma diferença importante na capacidade de curto-circuito das fontes ( $SIR < 0,5$ ) que, de uma forma aproximada, pode ser verificada por programas de curto-circuito, a instalação do localizador do lado da fonte mais forte produzirá menores erros.

TABELA 5.7 – Localização de falhas reais – Algoritmo de Takagi

LT	Tensão Nominal (kV)	Extensão (km)	Falta	Local (km)	Local Estimado (km)	
					Takagi (Dados Locais)	Takagi (Dados Remotos)
1	345	74,4	AT	60,0	70,1	64,1
			BT	54,0	58,1	52,9
2	500	105,6	AT	30,0	24,7	28,1
3	500	356,3	AT	127,0	129,7	104,6
4	500	342,7	CT	317,0	307,5	319,4
			AT	76,0	79,1	104,4
			CT	55,0	57,5	58,5
5	500	248,4	AT	223,0	221,0	234,0
			ACT	157,0	152,5	153,1
6	500	219,2	BT	218,0	216,9	219,1

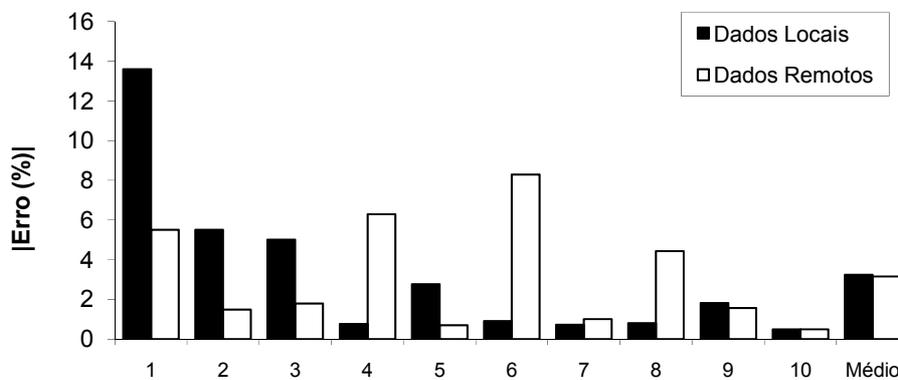


FIGURA 5.23 – Erros percentuais – Caso reais – Algoritmo de Takagi

TABELA 5.8 – Localização de falhas reais – Erros Percentuais - Algoritmo de Takagi

LT	Tensão Nominal (kV)	Extensão (km)	Falta	Local (km)	Local Estimado (km)	
					Takagi (Dados Locais)	Takagi (Dados Remotos)
1	345	74,4	AT	60,0	13,58	5,51
			BT	54,0	5,51	-1,48
2	500	105,6	AT	30,0	-5,01	-1,80
3	500	356,3	AT	127,0	0,76	-6,29
4	500	342,7	CT	317,0	-2,77	0,70
			AT	76,0	0,90	8,28
			CT	55,0	0,73	1,02
5	500	248,4	AT	223,0	-0,81	4,43
			ACT	157,0	-1,81	-1,57
6	500	219,2	BT	218,0	-0,50	0,50
Erro Médio <sup>(1)</sup>					3,24	3,16

(1) Considerando o módulo dos erros

# 6

## PROPOSTAS DE MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

É grande o desafio da tarefa de localização de falhas. Diversos fatores podem contribuir para reduzir a precisão, tais como erros de transformadores de corrente e potencial, nos parâmetros da linha, dentre outros. Além das dificuldades naturais, há a expectativa das empresas, que visam reduzir custos na implantação e facilitar a operação de equipamentos e métodos destinados à tarefa de localização de falhas.

Atualmente, para a localização de falhas, buscam-se algoritmos mais precisos e robustos ou um refinamento na resposta de outros propostos anteriormente, de forma que possam oferecer respostas mais confiáveis aos usuários. É importante que a equipe de manutenção seja encaminhada o mais próximo possível do ponto de defeito. Se algumas vezes o local informado for distante do real, há o risco de se perder a confiança na informação do localizador de falhas. Tendo como base as características da linha como número de terminais, a presença de circuito em paralelo e os fatores que contribuem para a degradação da precisão, é possível desenvolver novos algoritmos, melhorar os já existentes, ou selecionar outros algoritmos mais adequados.

Historicamente, os algoritmos que usam dados de um terminal foram, de início, os mais estudados e difundidos. Em seu favor, têm a facilidade de utilização junto às companhias, por não dependerem dos dados do terminal remoto e, por consequência, de nenhum sistema de comunicação e sincronização entre os terminais. Em relação à precisão, esta pode ser comprometida por alguns fatores:

- A falta de informações do terminal remoto normalmente conduz a simplificações na formulação dos métodos;
- O valor da resistência de falta, sendo desconhecido, quando elevado, influencia de maneira negativa os resultados;
- Os valores das impedâncias das fontes equivalentes terminais, presentes na formulação de vários algoritmos, no momento do curto-circuito, são desconhecidos;
- A utilização de dados coletados do lado da fonte fraca conduz a resultados menos precisos.

Os algoritmos de dois terminais são normalmente mais precisos, porém mais complexos para serem implantados no sistema elétrico, devido à necessidade de sincronização dos dados. Assim, a motivação para a busca de novos algoritmos e ferramentas para a localização de falhas deve levar em conta:

- A precisão e robustez do algoritmo para várias condições de falta;
- A facilidade de implantação e utilização;
- A redução de hipóteses simplificadoras;
- O atendimento a diversas topologias de linhas como existência de derivações e circuitos em paralelo.

Para análise de desempenho dos algoritmos de localização deste capítulo, foram simuladas falhas, utilizando-se o programa PSCAD, considerando-se linhas de transmissão trifásicas, de circuito simples, de 345 kV e 400 km de comprimento, e 138 kV e 200 km, com geometria e dados das fontes equivalentes mostrados no anexo. A fase utilizada entre as tensões das fontes foi de  $30^\circ$ . Foram simulados diversos casos, variando-se a distância até o ponto de falta, a resistência de falta e a capacidade de curto-circuito das fontes equivalentes. Os dados de falhas reais aplicados no capítulo 5 também foram utilizados, tendo sido os valores das impedâncias das fontes equivalentes obtidos a partir de programa de cálculo de curto-circuito da concessionária.

Na extração dos fasores de 60 Hz, utilizou-se uma variação do método dos mínimos quadrados, com uma janela de dados de 16 pontos por ciclo e um filtro passa-baixa Butterworth de 2ª ordem, com frequência de corte em 100 Hz. O erro obtido pelos algoritmos é expresso em função do comprimento total da linha, conforme equação (5.3).

## 6.1 – Estimação das Impedâncias das Fontes Equivalentes

Em alguns sistemas de localização fasorial, normalmente aqueles que utilizam dados de um terminal, existe a necessidade de se saberem os valores das impedâncias equivalentes das fontes terminais, que interferem na estimativa do local da falta. Estas impedâncias são, na verdade, os equivalentes de Thevenin, e, para obtê-las, os engenheiros das concessionárias recorrem, habitualmente, a bancos de dados ou a programas de

curto-circuito [50]. No entanto, devido à natureza dinâmica do sistema elétrico de potência, com entrada e saída de operação de linhas e equipamentos diversos, é esperado que sua topologia e, conseqüentemente, as impedâncias equivalentes de curto-circuito não permaneçam sempre as mesmas, influenciando os resultados fornecidos na localização de faltas.

### 6.1.1 - Cálculo das Impedâncias das Fontes

O método busca representar o equivalente Thevenin, a partir das extremidades da linha, através das ondas de tensões e correntes registradas. Pode-se, assim, considerar as condições da topologia de rede e carga, sendo possível obter as impedâncias equivalentes, no momento do curto-circuito, que refletem as condições reais do sistema, no momento da falta. Considere a FIG. 6.1, onde as barras terminais pertencem a sistemas elétricos diferentes. A única interligação entre os subsistemas A e B é a linha de transmissão SR.

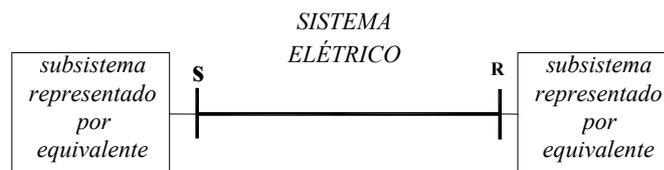


FIGURA 6.1 – Linha de transmissão com subsistemas equivalentes

O sistema elétrico pode ser representado, conforme o diagrama unifilar da FIG. 6.2, sendo  $Z_{SS}$  e  $Z_{RR}$  as impedâncias de entrada vistas das barras S e R.

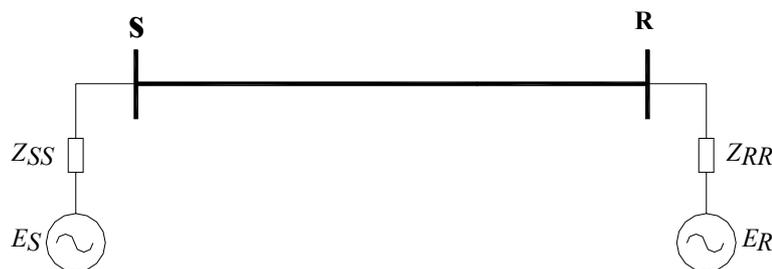


FIGURA 6.2 – Equivalente de um sistema elétrico a partir das barras S e R

Na determinação das impedâncias equivalentes, utilizam-se a técnica das componentes simétricas e o teorema da superposição. Desta forma, decompõe-se o circuito em redes de seqüência, conforme o tipo de falta ocorrido. Como exemplo, considere-se a

linha de transmissão trifásica da FIG 6.2, com um dado fluxo de carga. A rede de seqüências correspondente é mostrada na FIG 6.3(a), onde  $x$  é o ponto de falta e  $\ell$  o comprimento da linha. Na ocorrência de uma falta fase-terra em um ponto da linha, obtém-se o circuito em falta, conforme FIG 6.3(b). Através do teorema da superposição, chega-se ao circuito superposto da FIG 6.3(c), que pode ser obtido das redes pós-falta e pré-falta.

As impedâncias das fontes, calculadas a partir do circuito superposto da FIG 6.3(c), são dadas por

$$Z_{SS1} = -\frac{V_{S1} - V'_{S1}}{I_{S1} - I'_{S1}} = -\frac{V''_{S1}}{I''_{S1}} \quad (6.1)$$

$$Z_{SS0} = -\frac{V_{S0} - V'_{S0}}{I_{S0} - I'_{S0}} = -\frac{V''_{S0}}{I''_{S0}} \quad (6.2)$$

$$Z_{RR1} = -\frac{V_{R1} - V'_{R1}}{I_{R1} - I'_{R1}} = -\frac{V''_{R1}}{I''_{R1}} \quad (6.3)$$

$$Z_{RR0} = -\frac{V_{R0} - V'_{R0}}{I_{R0} - I'_{R0}} = -\frac{V''_{R0}}{I''_{R0}} \quad (6.4)$$

A ocorrência da impedância de seqüência é atrelada ao tipo de falta. Assim, um curto-circuito fase-terra fornece as impedâncias de seqüência positiva e zero das fontes, ao passo que um trifásico resultará apenas na de seqüência positiva.

Foram simuladas, a 80 km do terminal S, faltas AT nas linhas de 138 e 345 kV. Os valores estimados das resistências e reatâncias das fontes, a partir de um ciclo de falta, podem ser acompanhados nas FIG. 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7.

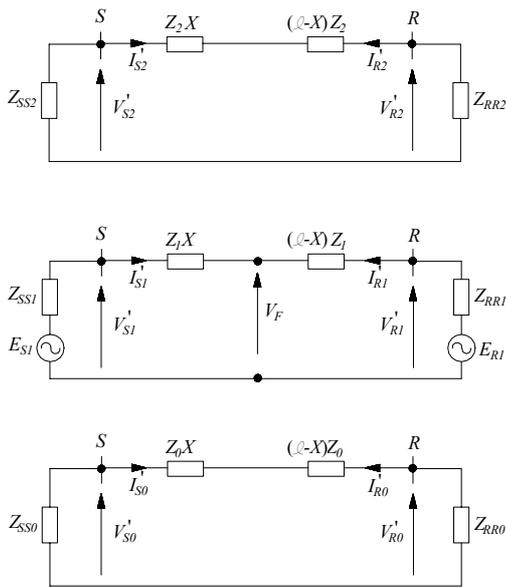


FIGURA 6.3(a) – Circuito pré-falta

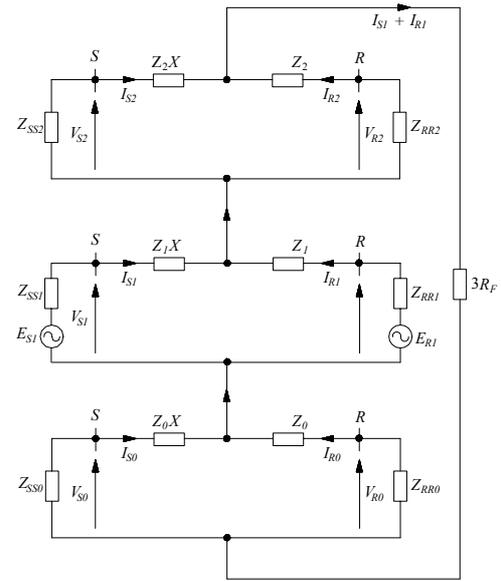


FIGURA 6.3(b) – Circuito em falta

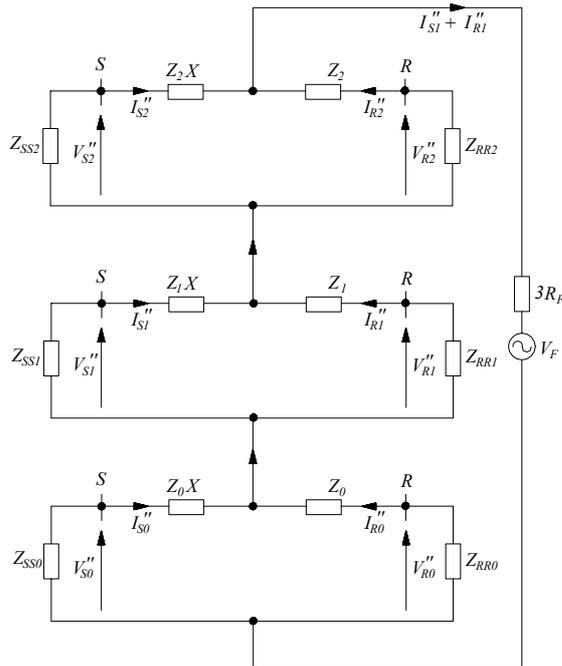


FIGURA 6.3(c) – Circuito superposto

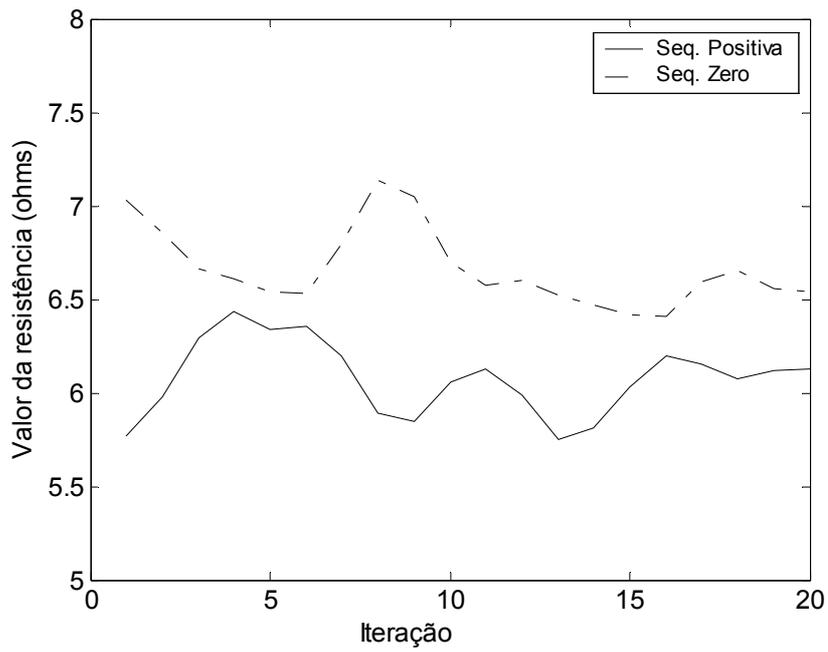


FIGURA 6.4 – Evolução da resistência estimada - Fonte da linha de 345 kV

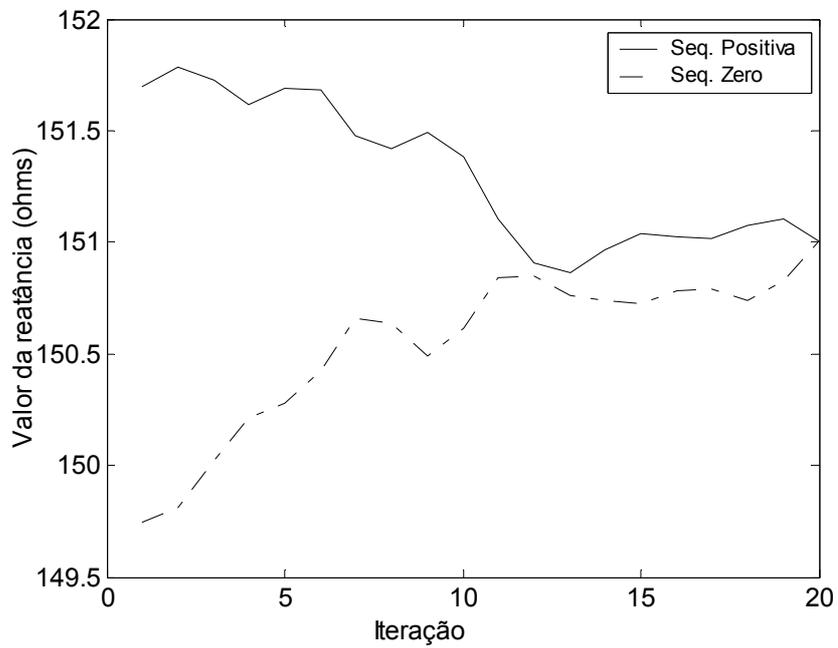


FIGURA 6.5 – Evolução da reatância estimada - Fonte da linha de 345 kV

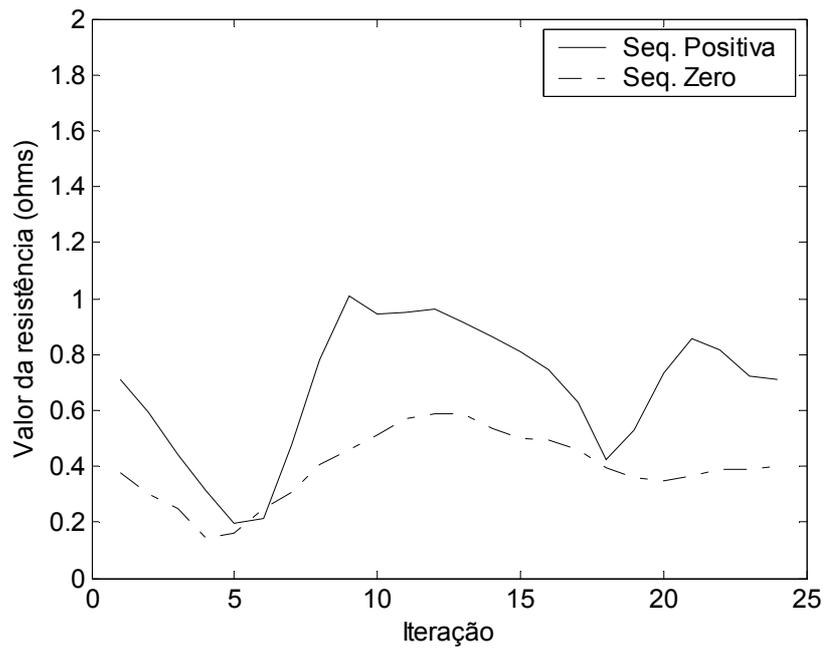


FIGURA 6.6 – Evolução da resistência estimada - Fonte da linha de 138 kV

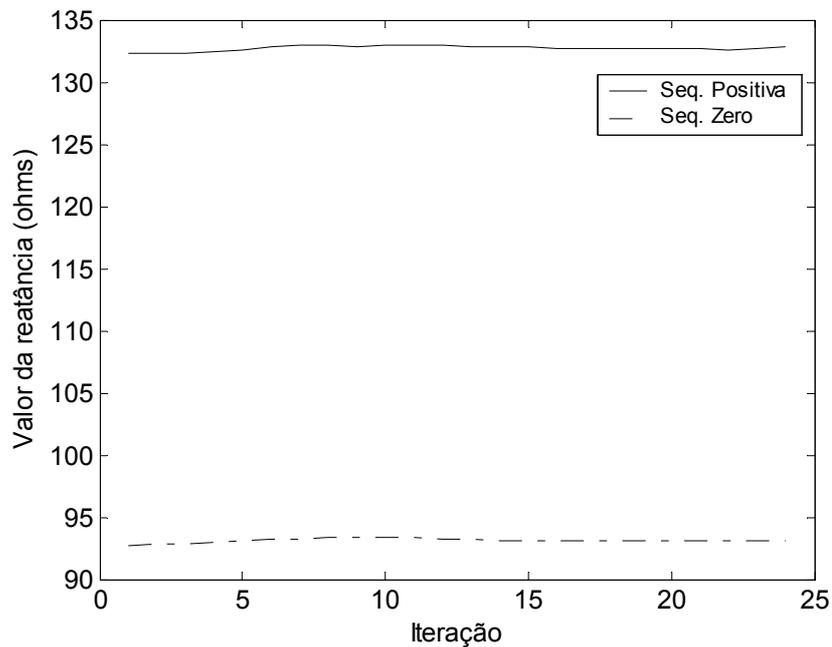


FIGURA 6.7 – Evolução da reatância estimada - Fonte da linha de 138 kV

Pelas figuras, vê-se que a estimativa das impedâncias das fontes possui boa precisão, sendo possível a determinação de seus valores, no momento do curto-circuito. Nas FIG. 6.8 e 6.9, são mostrados os erros obtidos a partir do terminal S, na aplicação do algoritmo de Wiszniewski, na linha de 138 kV. As faltas foram simuladas do tipo AT com

resistência de falta de 20 e 100 ohms, para as fontes com a mesma capacidade de curto-circuito ( $SIR = 1$ ). Consideraram-se duas situações para esta aplicação, em relação ao valor de entrada das impedâncias das fontes: a primeira, desprezando-as e a outra, com as impedâncias calculadas a partir dos dados de entrada.

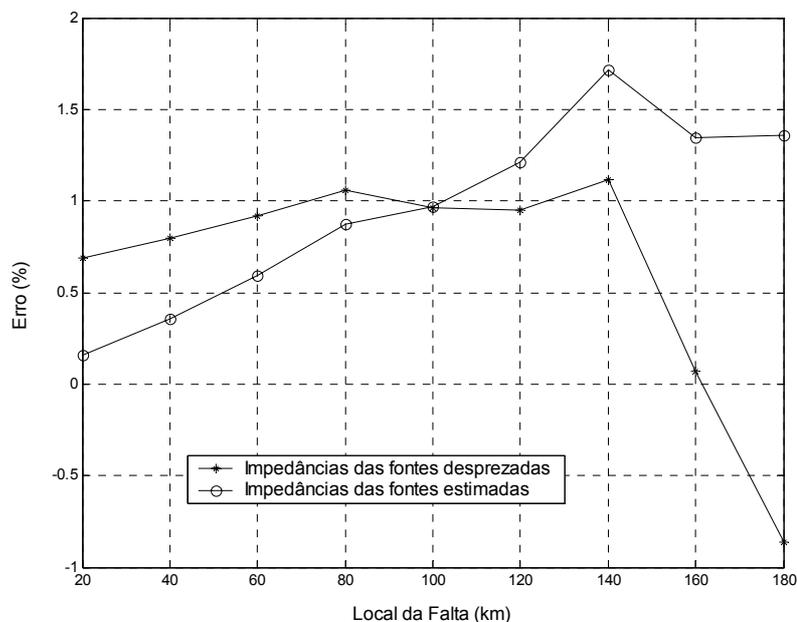


FIGURA 6.8 – Erros de localização para faltas AT,  $SIR = 1$  e  $R_F = 20$  ohms

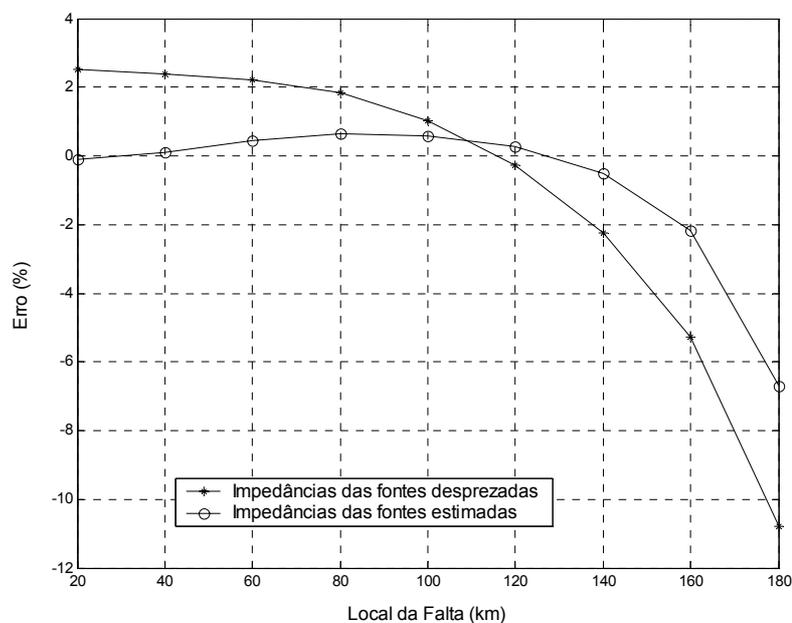


FIGURA 6.9 – Erros de localização para faltas AT,  $SIR = 1$  e  $R_F = 100$  ohms

Observa-se, para a resistência de falta de 20 ohms, que os erros têm a mesma ordem de grandeza, tornando-se maiores quando a resistência passa a 100 ohms e não se considera a impedância da fonte na aplicação do algoritmo. Por utilizar apenas um terminal, à medida que a falta se aproxima do terminal remoto, os erros aumentam. Para as FIG. 6.10 e 6.11, alterou-se a capacidade de curto-circuito da fonte local (terminal S) para um valor dez vezes menor ( $SIR = 10$ ). Os erros aumentaram consideravelmente, quando não se forneceram as impedâncias das fontes, tornando-se maiores para as faltas próximas à extremidade oposta.

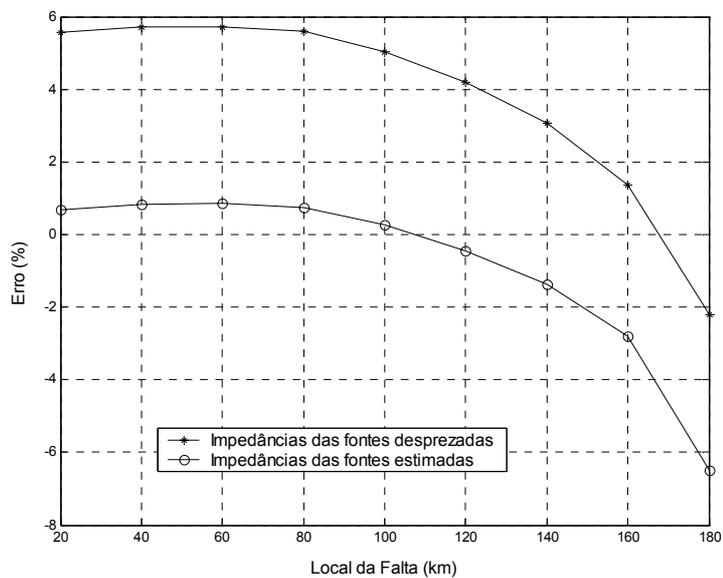


FIGURA 6.10 – Erros de localização para faltas AT,  $SIR = 10$  e  $R_F = 20$  ohms

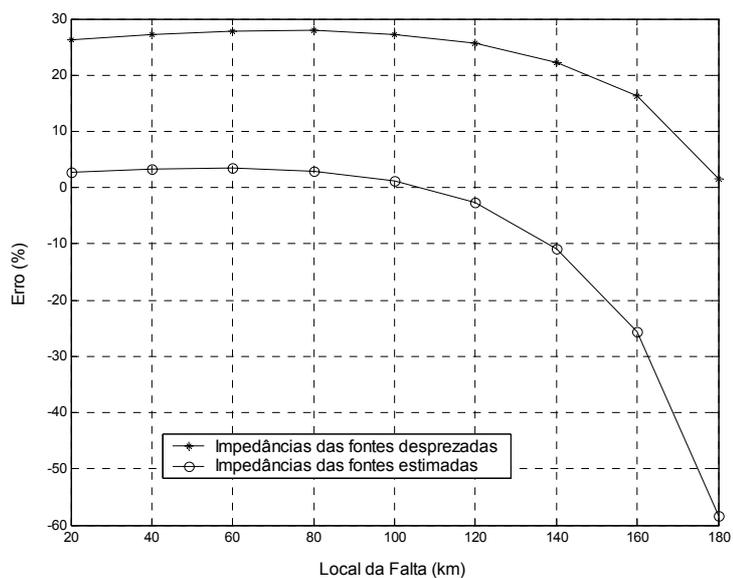


FIGURA 6.11 – Erros de localização para faltas AT,  $SIR = 10$  e  $R_F = 100$  ohms

Na TAB. 6.1, apresentam-se os valores de impedâncias fornecidos pela concessionária e os obtidos de casos reais de curto-circuito, determinados através do circuito superposto. Existem diferenças para todos os casos, até os calculados para faltas na mesma linha, ocorridas em datas diferentes, indicando que as mudanças no sistema elétrico, efetivamente, refletem-se nos equivalentes terminais da linha de transmissão.

TABELA 6.1 – Impedâncias das fontes para faltas reais

LT	Extensão (km)	Falta	Impedância Fornecida Pela Concessionária				Impedância Estimada			
			Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
			$Z_0$	$Z_1$	$Z_0$	$Z_1$	$Z_0$	$Z_1$	$Z_0$	$Z_1$
1	74,4	AT	4,1+j33,6	4,0+j34,1	2,7+j39,4	6,3+j53,8	4,7+j39,5	4,6+j40,2	3,9+j37,8	7,1+j53,8
		BT					9,7+j38,1	5,6+j37,5	1,4+j38,4	3,7+j64,5
2	356,3	AT	2,3+j25,4	0,9+j20,1	2,2+j26,0	1,8+j31,4	4,7+j29,7	1,1+j34,0	0,2+j34,2	0,1+j56,8

Na TAB. 6.2, têm-se os resultados da aplicação do algoritmo de Wiszniewski a casos reais de faltas, em três situações: desprezando a impedância da fonte; com os valores fornecidos pela concessionária e, finalmente, estimando a impedância a partir dos dados de entrada. A resistência de falta foi obtida, conforme proposto em [2] por Izonel & Clever. Procedeu-se à localização, a partir do terminal cuja fonte apresentou menor impedância, conforme TAB. 6.1. Observa-se que não há diferenças significativas nos locais estimados, à medida que se altera o valor atribuído à impedância da fonte, haja vista que as resistências de falta apresentam baixos valores, tornando pequeno o efeito das impedâncias das fontes e a correção feita pelo algoritmo de Wiszniewski para cálculo da distância.

TABELA 6.2 – Localização para casos reais de faltas – Algoritmo de Wiszniewski

LT	Extensão (km)	Falta	$R_F$ (ohms)	Local da Falta (km)	Local Estimado (km)		
					$Z_{\text{FONTE}}$ (Desprezada)	$Z_{\text{FONTE}}$ (Concessionária)	$Z_{\text{FONTE}}$ (Estimada)
1	74,4	AT	4,3	60	69,5	69,7	68,5
		BT	3,8	54	58,9	59,1	58,2
2	356,3	AT	18,2	127	126,9	126,7	127,0
3	219,2	BT	1,3	1,2	0,0	0,0	0,0

## 6.2 – Método de Localização Aplicando Otimização – OtimLoc

Na busca de novos algoritmos de localização de faltas, de forma a minimizar os erros, foi desenvolvido pelo autor, juntamente com a equipe do PROTLab<sup>(2)</sup>/LRC<sup>(3)</sup>/UFMG<sup>(4)</sup>, um novo método de localização, em que, aplicando-se uma técnica adequada de otimização na função objetivo que descreve o problema, é possível determinar a distância e a resistência de falta. As funções objetivo foram criadas para os diversos tipos de faltas existentes (monofásica, bifásica, bifásica para terra e trifásica), utilizando-se dados dos dois terminais da linha de transmissão monitorada. Assim

$$F = F(x, R_F, \beta) \quad (6.5)$$

onde  $x$  é o ponto de falta,  $R_F$  a resistência de falta e  $\beta$  é o tipo de falta. No desenvolvimento do trabalho, a variável  $\beta$  não foi utilizada explicitamente, embora seja clara a sua importância na determinação dos resultados.

### 6.2.1 – Modelo de Linha Curta

Considere-se a linha de transmissão da FIG. 6.12, com fontes equivalentes nos terminais S e R.

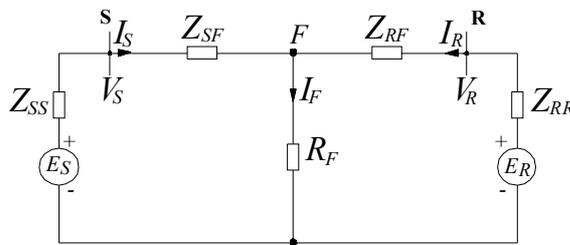


FIGURA 6.12 – Linha de transmissão em falta

No ponto  $F$ , ocorre um curto-circuito através de uma resistência de falta  $R_F$  a uma distância  $x$  do terminal  $S$ . No método, utiliza-se a abordagem de separar o circuito de falta em componentes de seqüência. Como exemplo da obtenção da função objetivo, em uma linha de transmissão trifásica, considere a falta fase A para terra, representada no diagrama da FIG. 6.13.

<sup>2</sup> PROTLab – Laboratório de Proteção Digital

<sup>3</sup> LRC – (Lightning Research Center) Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas)

<sup>4</sup> UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

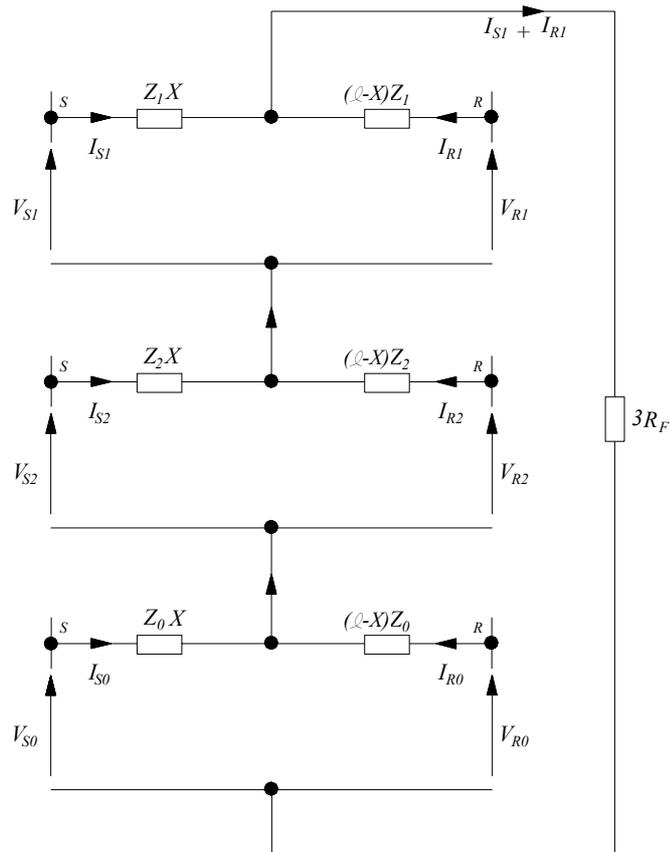


FIGURA 6.13 – Circuito para uma falta AT

Aplicando-se a lei de Kirchoff das tensões, obtém-se

$$V_{S1} + V_{S2} + V_{S0} - xZ_1(I_{S1} + I_{S2}) - xZ_0 I_{S0} - 3R_F(I_{S1} + I_{R1}) = 0 \quad (6.6)$$

Somando e subtraindo  $xZ_1 I_{S0}$  vem que

$$V_{S0} + V_{S1} + V_{S2} - xZ_1(I_{S0} + I_{S1} + I_{S2}) - xI_{S0}(Z_0 - Z_1) - 3R_F(I_{S1} + I_{R1}) = 0 \quad (6.7)$$

Sabendo-se que

$$\begin{aligned} V_{S0} + V_{S1} + V_{S2} &= V_S \\ I_{S0} + I_{S1} + I_{S2} &= I_S \end{aligned} \quad (6.8)$$

Chega-se a

$$V_S - xZ_1(I_S + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}I_{S0}) - 3R_F(I_{S1} + I_{R1}) = 0 \quad (6.9)$$

Podendo-se escrever que

$$V_S^M - V_S^C = 0 \quad (6.10)$$

onde

$$V_S^C = xZ_1(I_S + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}I_{S0}) - 3R_F(I_{S1} + I_{R1}) \quad (6.11)$$

sendo  $V_S^M$  e  $V_S^C$ , respectivamente, as tensões medida e calculada no terminal S.

Tomando-se o quadrado do módulo da equação (6.10), chega-se a

$$F(x, R_F) = |V_S^M - V_S^C|^2 \quad (6.12)$$

ou seja

$$F(x, R_F) = \Re e \left( (V_S - xZ_1(I_S + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}I_{S0}) - 3R_F(I_{S1} + I_{R1})) \right)^2 + \Im m \left( (V_S - xZ_1(I_S + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}I_{S0}) - 3R_F(I_{S1} + I_{R1})) \right)^2 \quad (6.13)$$

Em (6.13) o local e a resistência de falta são os valores de  $x$  e  $R_F$  que levam a equação para o ponto de mínimo,  $V_S$  e  $I_S$  a tensão e a corrente medidas para a fase em falta,  $I_{S1}$  e  $I_{S0}$  as correntes de seqüência positiva e zero do terminal local e  $I_{R1}$  a corrente de seqüência positiva no terminal remoto, calculadas a partir das correntes medidas nas fases da linha. Na FIG. 6.14, mostra-se a função objetivo para uma falta AT na linha de 138 kV, com resistência de 20 ohms a 100 km do terminal S. Na FIG. 6.15, tem-se a evolução da função objetivo e, na FIG. 6.16, apresenta-se a evolução do algoritmo, a partir do instante de falta, para a determinação da distância e da resistência de falta.

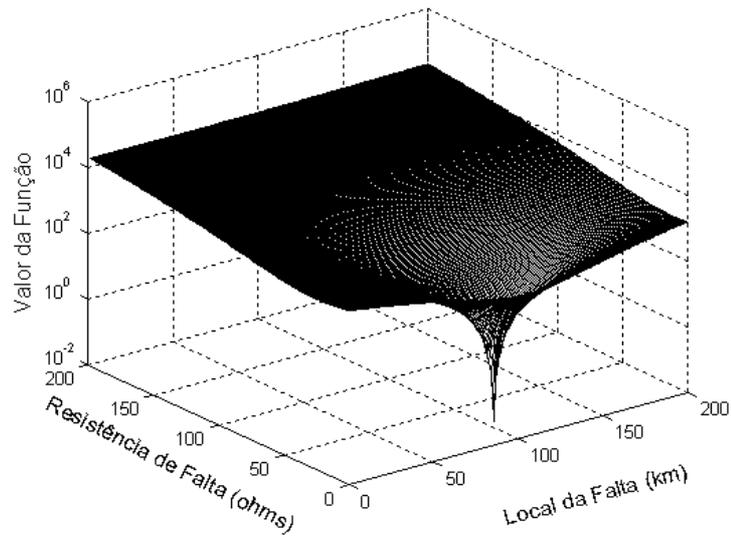


FIGURA 6.14 – Função objetivo para uma falta AT

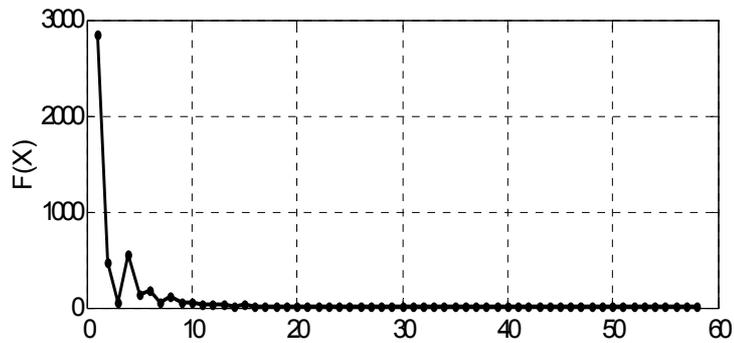


FIGURA 6.15 – Evolução do objetivo

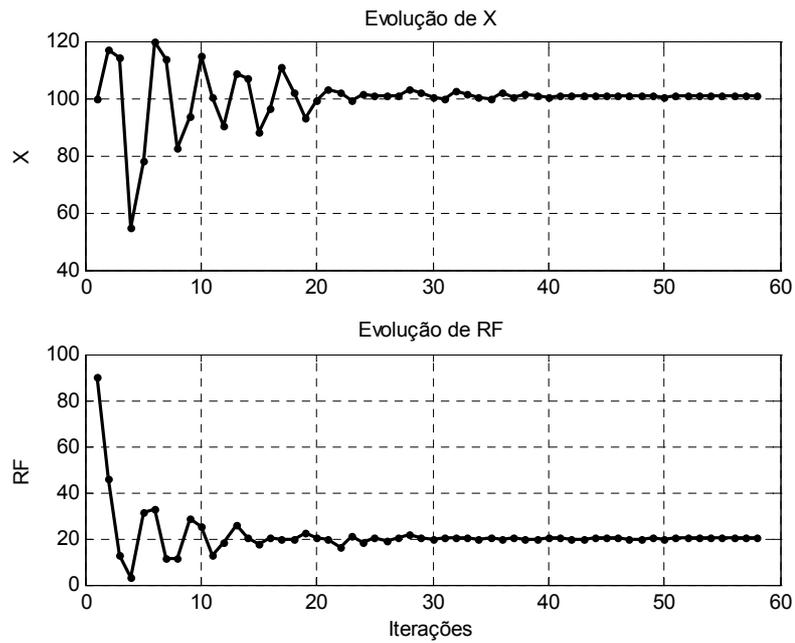


FIGURA 6.16 – Evolução das variáveis distância e resistência de falta

Na FIG. 6.15, observa-se que o algoritmo converge, rapidamente, para o mínimo da função, ocorrendo oscilações iniciais nas variáveis, que diminuem à medida que o algoritmo evolui, conforme FIG. 6.16

Na FIG. 6.17 apresentam-se os erros de localização obtidos para faltas AT em diversos pontos da linha, com resistências de falta de 20 e 100 ohms. Para minimizar a função objetivo, foi utilizado o algoritmo elipsoidal [51], desenvolvido pelo GOPAC<sup>(5)</sup>/UFMG. Os erros obtidos foram abaixo de 1,2%, mesmo com elevado valor de resistência de falta.

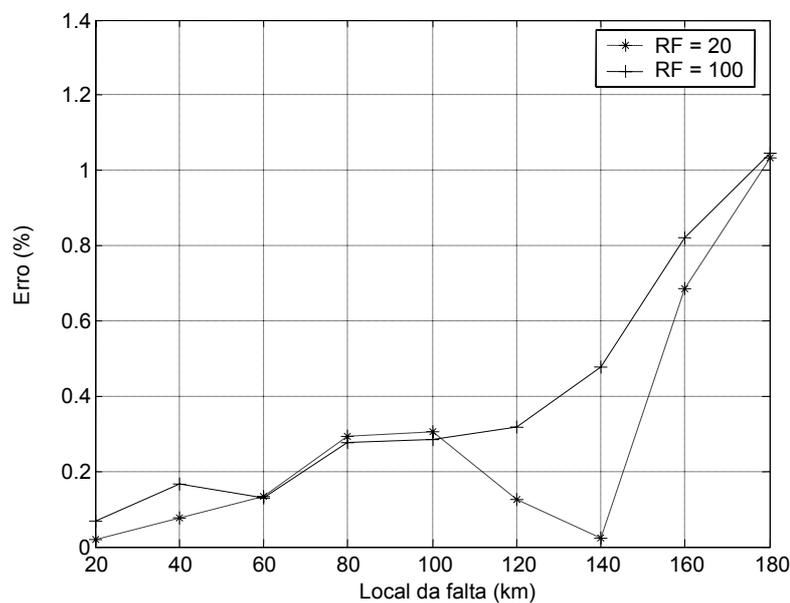


FIGURA 6.17 - Erros de localização - OtimLoc – Modelo de linha curta

Na FIG. 6.18, têm-se os valores estimados para a resistência de falta, a partir das amostras do terminal S, por dois ciclos, após um curto-circuito fase terra, a 80 km, com resistência de falta de 20 ohms.

O OtimLoc foi aplicado a casos reais de curto-circuito do sistema elétrico brasileiro, e, na TAB. 6.3, apresentam-se os resultados. As colunas local e remoto indicam que as localizações foram feitas a partir dos dois terminais, o que altera, além das grandezas locais, a corrente de seqüência positiva  $I_{R1}$ , conforme equação (6.13). Na FIG. 6.19, tem-se o valor da resistência de falta estimado para o terceiro caso da TAB. 6.3.

<sup>5</sup> GOPAC – Grupo de Otimização e Projeto Assistido por Computador

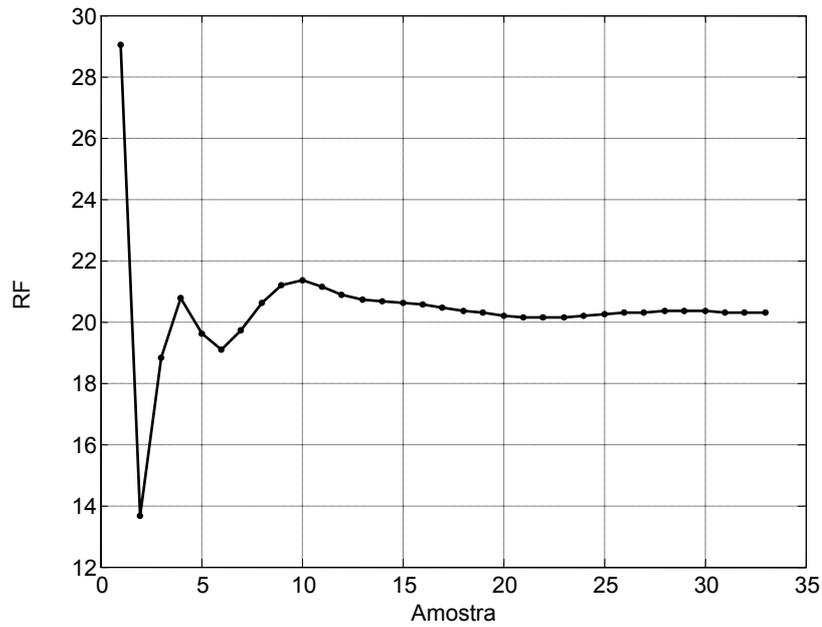


FIGURA 6.18 – Resistência de falta estimada durante um curto-circuito

TABELA 6.3 - Casos reais – OtimLoc – Modelo de linha curta

LT	Extensão (km)	Falta	Local (km)	$R_F^{(1)}$ (Ohms)	Local Estimado (km)			Resistência de Falta Estimada (ohms)		
					Local	Remoto	Média	Local	Remoto	Média
1	74,4	AT	60,0	4,3	69,3	62,7	66,0	3,7	3,1	3,4
		BT	54,0	3,8	57,8	52,7	55,3	4,4	2,9	3,7
2	105,6	AT	30,0	23,9	24,8	32,4	28,6	27,9	30,0	29,0
3	356,3	AT	127,0	17,9	124,8	130,5	127,7	20,3	26,1	23,2
4	342,7	CT	317,0	1,6	311,2	319,3	315,3	3,2	1,1	2,2
		AT	76,0	1,7	78,7	100,3	89,5	2,3	0,8	1,6
		CT	55,0	25,3	53,4	67,9	60,7	30,0	29,5	29,8
5	248,4	AT	223,0	2,4	224,5	234,4	229,5	2,4	2,4	2,4
		ACT	157,0	1,4	153,4	158,1	155,8	1,1	0,7	0,9
6	219,2	BT	218,0	1,3	219,1	219,1	219,1	1,8	1,3	1,1

É importante destacar, que para que ocorra um bom desempenho, deve-se executar um pré-processamento dos dados adequado, antes da aplicação do método.

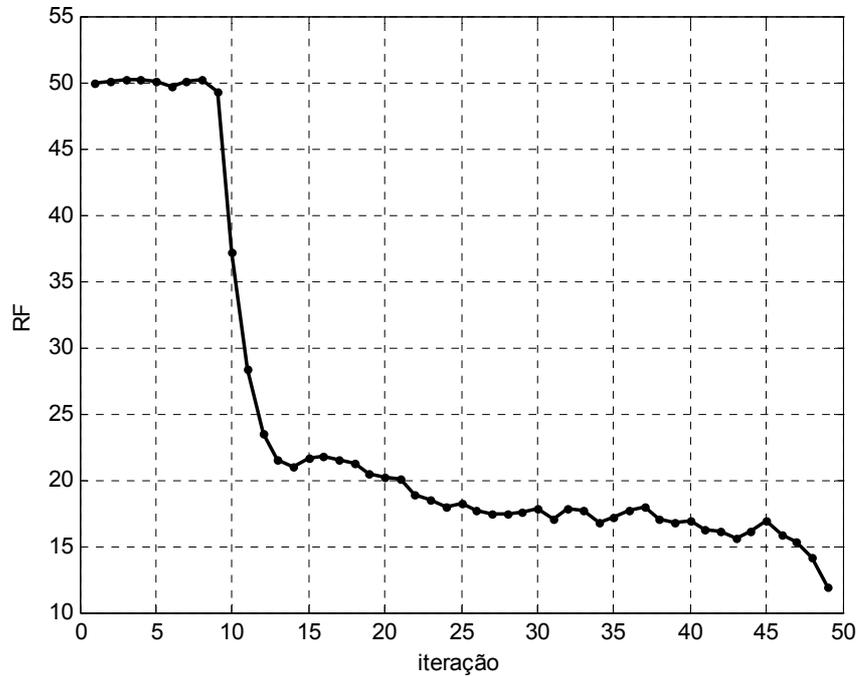


FIGURA 6.19 – Resistência de falta estimada em um caso real

### 6.2.2 – Modelo de Linha Longa

Para o modelo de linha longa do OtimLoc, considere a FIG. 6.13, com os parâmetros distribuídos ao longo da linha de transmissão, resultando nas equações hiperbólicas. Aplicando-se a lei de Kirchhoff das tensões, para o ponto de falta

$$V_{S1} + V_{S2} + V_{S0} - 3R_F(I_{S1} + I_{R1}) = 0 \quad (6.14)$$

A função objetivo, cujo ponto de mínimo é o local da falta, é dada por

$$F(x, R_F) = |V_{S1} + V_{S2} + V_{S0} - 3R_F(I_{S1} + I_{R1})| \quad (6.15)$$

onde

$$\begin{aligned}
 V_{S0} &= \cosh(\gamma_0 x) V_{S0} - Z_{C0} \sinh(\gamma_0 x) I_{S0} \\
 V_{S1} &= \cosh(\gamma_1 x) V_{S1} - Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x) I_{S1} \\
 V_{S2} &= \cosh(\gamma_2 x) V_{S2} - Z_{C2} \sinh(\gamma_2 x) I_{S2} \\
 I_{S1} &= \sinh(\gamma_1 x) V_{S1} / Z_{C1} - \cos(\gamma_1 x) I_{S1} \\
 I_{R1} &= \sinh(\gamma_1 x) V_{R1} / Z_{C1} - \cos(\gamma_1 x) I_{R1}
 \end{aligned}$$

Na FIG. 6.20, apresentam-se os erros de localização obtidos para faltas AT, em diversos pontos da linha de 138 kV e 200 km, com resistências de falta de 20 e 100 ohms. Os erros são menores que os obtidos na FIG. 6.17, em função do modelo de linha do algoritmo, que considera as capacitâncias distribuídas.

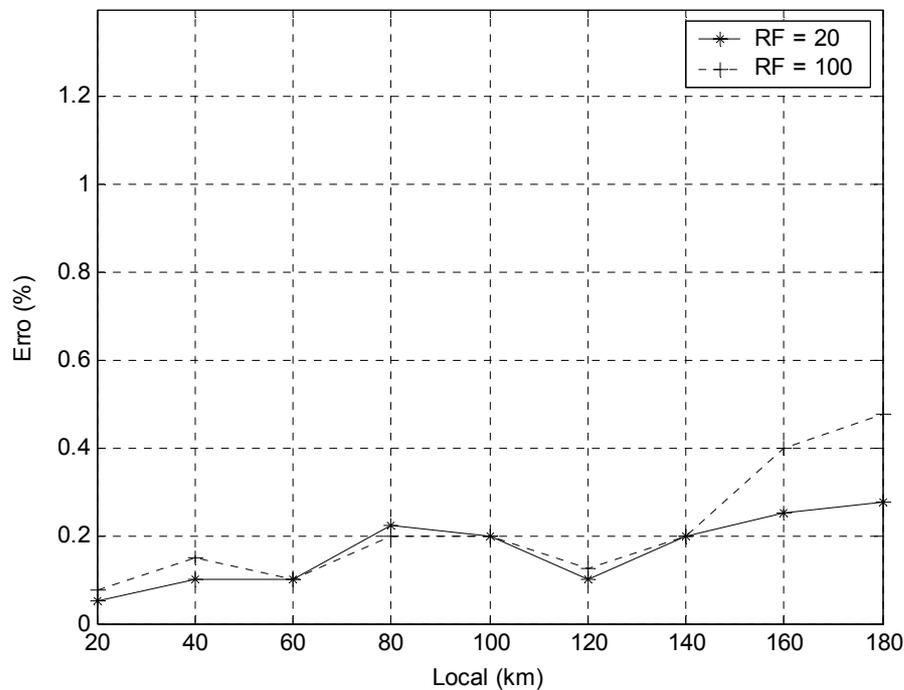


FIGURA 6.20 – Erros de localização - OtimLoc – Modelo de linha longa

O modelo de linha longa do OtimLoc foi aplicado aos casos reais de curto-circuito, e, na TAB. 6.4, apresentam-se os resultados. Na TAB. 6.5, têm-se os erros percentuais para os resultados dos OtimLoc nos modelos de linha curta e longa, calculados para a coluna média das TAB. 6.3 e 6.4.

TABELA 6.4 - Casos reais – OtimLoc – Modelo de linha longa

LT	Extensão (km)	Falta	Local (km)	$R_F^{(1)}$ (Ohms)	Local Estimado (km)			Resistência de Falta Estimada (ohms)		
					Local	Remoto	Média	Local	Remoto	Média
1	74,4	AT	60,0	4,3	69,4	62,3	65,9	3,5	2,9	3,2
		BT	54,0	3,8	57,9	52,6	55,2	4,2	2,8	3,5
2	105,6	AT	30,0	23,9	29,8	26,0	27,9	24,6	30,0	27,3
3	356,3	AT	127,0	17,9	129,0	112,0	120,5	17,9	16,5	17,2
4	342,7	CT	317,0	1,6	308,1	319,2	313,7	2,5	1,0	1,8
		AT	76,0	1,7	78,8	103,6	91,2	1,8	1,1	1,5
		CT	55,0	25,3	59,4	54,6	57,0	24,1	23,6	23,9
5	248,4	AT	223,0	2,4	221,3	234,4	227,9	2,3	2,0	2,2
		ACT	157,0	1,4	152,5	154,8	153,7	0,6	1,0	0,8
6	219,2	BT	218,0	1,3	217,8	219,1	218,2	1,5	1,1	1,3

TABELA 6.5 – Erros Percentuais - Casos reais – OtimLoc

LT	Extensão (km)	Falta	Local (km)	$R_F^{(1)}$ (Ohms)	Erro Percentual (%)	
					Linha curta	Linha longa
1	74,4	AT	60,0	4,3	8,06	7,93
		BT	54,0	3,8	1,75	1,61
2	105,6	AT	30,0	23,9	-1,32	-1,98
3	356,3	AT	127,0	17,9	0,20	-1,82
4	342,7	CT	317,0	1,6	-0,50	-0,96
		AT	76,0	1,7	3,94	4,44
		CT	55,0	25,3	1,66	0,58
5	248,4	AT	223,0	2,4	2,62	1,97
		ACT	157,0	1,4	-0,48	-1,32
6	219,2	BT	218,0	1,3	0,50	0,09
Erro Médio (%) <sup>(1)</sup>					2,10	2,27

<sup>(1)</sup> Considerando o módulo dos erros

Embora, nos casos simulados, os erros tenham sido menores para o modelo de linha longa, o mesmo não ocorreu com os casos reais, onde os melhores resultados se alternam de uma falta a outra, sendo que o erros médios foram semelhantes.

Nos métodos de localização de faltas que utilizam fasores de dois terminais da linha, em casos práticos, considera-se uma boa estimativa aquela que apresenta erro de até 2% da extensão da linha [52]. Este valor baseia-se na experiência dos engenheiros que trabalham com localização de faltas. Desta forma, o método conduziu a bons resultados para a maior parte dos casos analisados da TAB. 6.5.

### 6.3 – Método de Localização Para Linhas de Dois Terminais com Dados não Sincronizados – LocMod

Buscando técnicas de localização automáticas de faltas em linhas de transmissão, de forma a minimizar os erros, foi desenvolvido o método denominado LocMod, que utiliza dados de tensão e corrente de ambos os terminais da linha, sem a necessidade de sincronização. Este método teve como motivação o fato de ser a sincronização considerada uma das desvantagens nos algoritmos que usam dados de dois terminais. O princípio baseia-se na igualdade dos módulos das tensões no ponto de falta, calculados a partir dos dados de cada um dos terminais. Inicialmente, foi desenvolvido o método para linhas curtas e depois apresentado o estudo para linhas longas.

#### 6.3.1 – Modelo de Linha Curta

O desenvolvimento foi realizado, inicialmente, para uma linha curta monofásica. Considere-se a linha da FIG. 6.21.

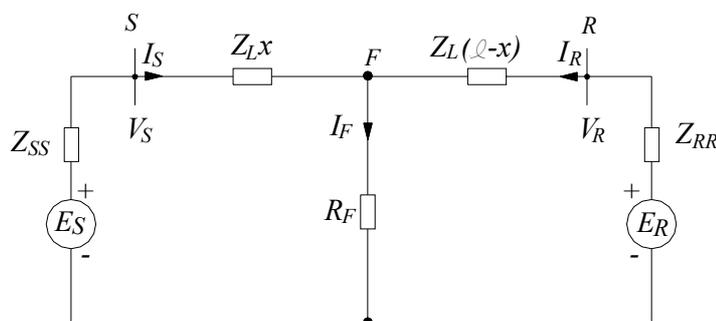


FIGURA 6.21 – Linha Monofásica

Assim, pode-se escrever que

$$V_F = V_S - I_S x Z_L \quad (6.16)$$

$$V_F = V_R - I_R (\ell - x) Z_L \quad (6.17)$$

Tomando o módulo de  $V_F$  das equações (6.16) e (6.17) e igualando-os

$$|V_S - I_S x Z_L| = |V_R - I_R (\ell - x) Z_L| \quad (6.18)$$

Considerando

$$\begin{aligned} P &= Z_L I_S \\ Q &= Z_L I_R \end{aligned} \quad (6.19)$$

Tem-se para (6.18)

$$|V_S - Px| = |V_R - Q(\ell - x)| \quad (6.20)$$

Desenvolvendo (6.20) resulta em

$$\begin{aligned} (|V_S| \cos \theta_S - |P| x \cos \theta_P)^2 + (|V_S| \sin \theta_S - |P| x \sin \theta_P)^2 = \\ (|V_R| \cos \theta_R - |Q| (\ell - x) \cos \theta_Q)^2 + (|V_R| \sin \theta_R - |Q| (\ell - x) \sin \theta_Q)^2 \end{aligned} \quad (6.21)$$

onde  $\theta_P$  e  $\theta_Q$  são os ângulos respectivamente de  $P$  e  $Q$  em (6.21),  $\theta_S$  e  $\theta_R$  as fases de  $V_S$  e  $V_R$ . Desenvolvendo cada uma das partes da equação (6.21)

$$(|V_S| \cos \theta_S - |P| x \cos \theta_P)^2 = |V_S|^2 \cos^2 \theta_S - 2|V_S| \cos \theta_S |P| x \cos \theta_P + |P|^2 x^2 \cos^2 \theta_P \quad (6.22)$$

$$(|V_S| \sin \theta_S - |P| x \sin \theta_P)^2 = |V_S|^2 \sin^2 \theta_S - 2|V_S| \sin \theta_S |P| x \sin \theta_P + |P|^2 x^2 \sin^2 \theta_P \quad (6.23)$$

$$(|V_R| \cos \theta_R - |Q| (\ell - x) \cos \theta_Q)^2 = |V_R|^2 \cos^2 \theta_R - 2|V_R| \cos \theta_R |Q| (\ell - x) \cos \theta_Q + |Q|^2 (\ell - x)^2 \cos^2 \theta_Q \quad (6.24)$$

$$(|V_R| \sin \theta_R - |Q| (\ell - x) \sin \theta_Q)^2 = |V_R|^2 \sin^2 \theta_R - 2|V_R| \sin \theta_R |Q| (\ell - x) \sin \theta_Q + |Q|^2 (\ell - x)^2 \sin^2 \theta_Q \quad (6.25)$$

Somando (6.22) e (6.23), tem-se

$$|V_S|^2 (\cos\theta_S^2 + \text{sen}\theta_S^2) - 2|V_S||P|x(\cos\theta_S\cos\theta_P + \text{sen}\theta_S\text{sen}\theta_P) + |P|^2 x^2 (\text{sen}\theta_P^2 + \cos\theta_P^2) \quad (6.26)$$

$$|V_S|^2 - 2|V_S||P|x\cos(\theta_S - \theta_P) + |P|^2 x^2 \quad (6.27)$$

Somando (6.24) e (6.25)

$$|V_R|^2 (\cos\theta_R^2 + \text{sen}\theta_R^2) - 2|V_R||Q|(\ell - x)(\cos\theta_R\cos\theta_Q + \text{sen}\theta_R\text{sen}\theta_Q) + |Q|^2 (\ell - x)^2 (\cos\theta_Q^2 + \text{sen}\theta_Q^2) \quad (6.28)$$

$$|V_R|^2 - 2|V_R||Q|(\ell - x)\cos(\theta_R - \theta_Q) + |Q|^2 (\ell - x)^2 \quad (6.29)$$

Igualando (6.27) e (6.29) e considerando as identidades trigonométricas

$$|V_S|^2 - 2|V_S||P|x\cos(\theta_S - \theta_P) + |P|^2 x^2 = |V_R|^2 - 2|V_R||Q|(\ell - x)\cos(\theta_R - \theta_Q) + |Q|^2 (\ell - x)^2 \quad (6.30)$$

Desenvolvendo (6.30)

$$|P|^2 x^2 - |Q|^2 (\ell - x)^2 - 2|V_S||P|x\cos(\theta_S - \theta_P) + 2|V_R||Q|(\ell - x)\cos(\theta_R - \theta_Q) + |V_S|^2 - |V_R|^2 + 2|V_R||Q|\ell\cos(\theta_R - \theta_Q) - |Q|^2 \ell^2 = 0 \quad (6.31)$$

Chegando a

$$x^2 (|P|^2 - |Q|^2) - 2x \left[ |V_S||P|\cos(\theta_S - \theta_P) + |V_R||Q|\cos(\theta_R - \theta_Q) - \ell|Q|^2 \right] + |V_S|^2 - |V_R|^2 + 2|V_R||Q|\ell\cos(\theta_R - \theta_Q) - |Q|^2 \ell^2 = 0 \quad (6.32)$$

Em (6.32), tem-se uma equação de segundo grau, sendo que uma das raízes será positiva e dentro dos limites físicos da linha, fornecendo o local da falta. As grandezas utilizadas são as do circuito superposto.

Para testar o método LocMod, foram aplicados arquivos de faltas AT da linha de 138 kV, em diversos pontos, com resistência de falta de 100 ohms. O método de Johns [25] também foi utilizado na localização das faltas para fins de comparação dos resultados. Na obtenção dos erros mostrados na FIG. 6.22, os dados encontram-se sincronizados, tal como obtidos no PSCAD. Já nas FIG. 6.23 e 6.24, provocou-se uma defasagem na fase dos dados remotos de 45 e 90 graus, respectivamente. É importante destacar que o algoritmo de Johns

pode ser aplicado a dados não sincronizados, desde que haja corrente pré-falha para fazer o sincronismo dos dados, conforme explicado no item 4.7 do capítulo 4.

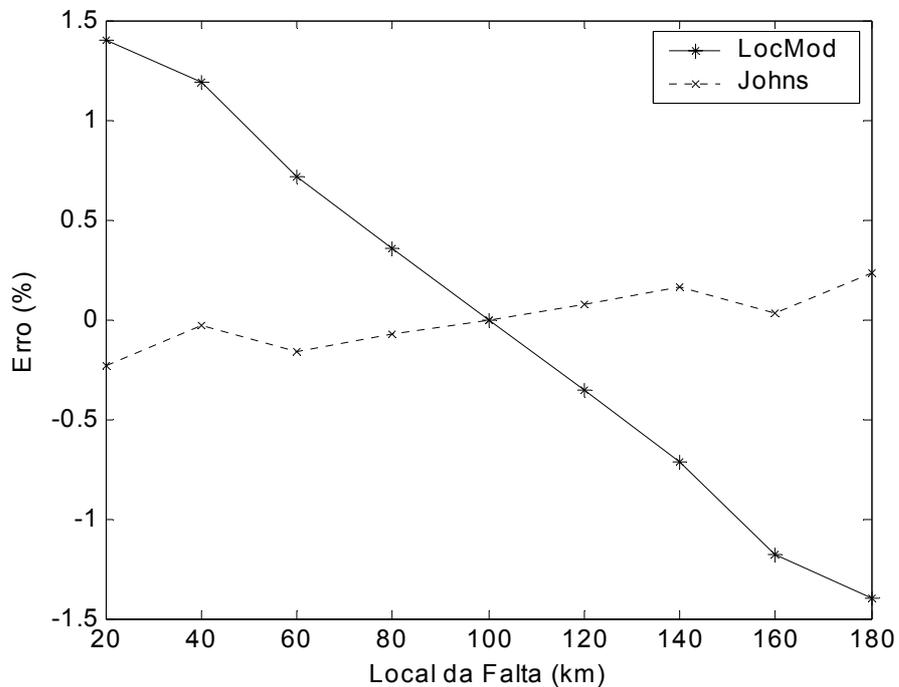


FIGURA 6.22 – Erros de localização – Dados Sincronizados - Linha de 138 KV – Falta AT

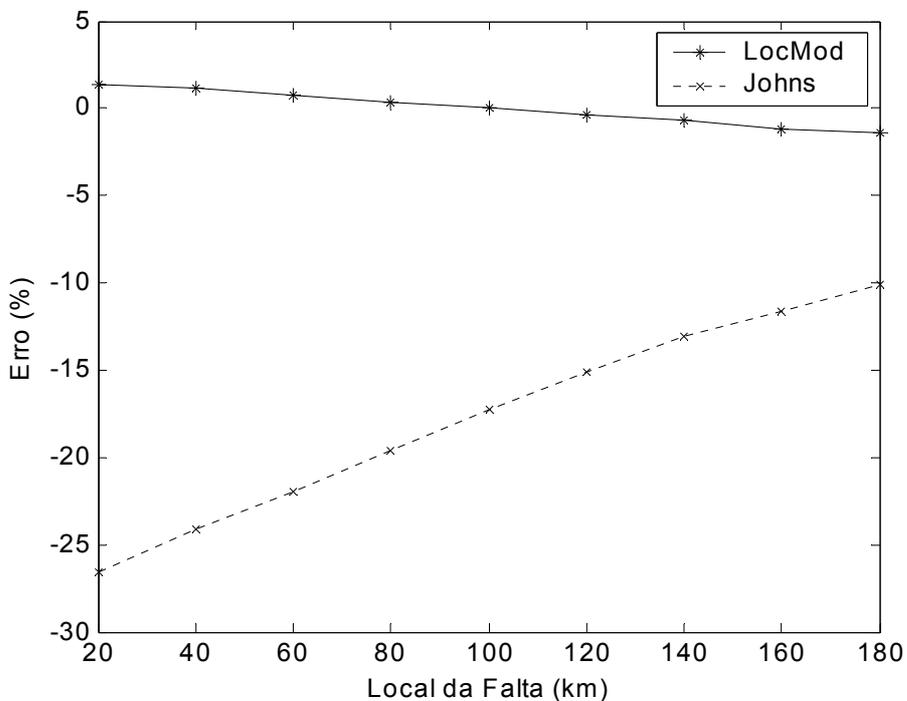


FIGURA 6.23 – Erros de localização – Dados Não Sincronizados - Defasagem de 45 graus  
Linha de 138 KV – Falta AT

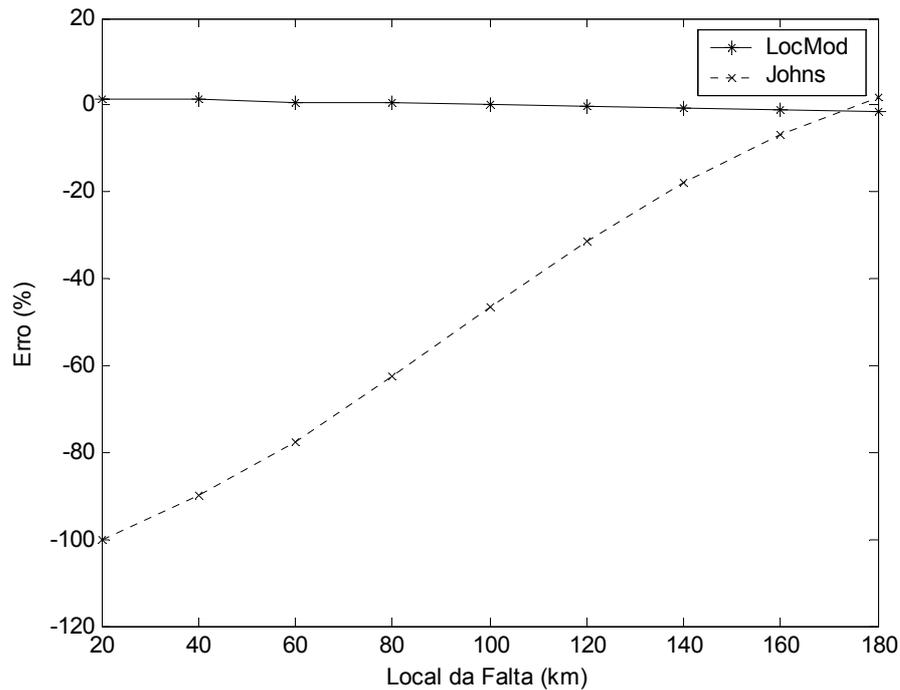


FIGURA 6.24 – Erros de localização – Dados Não Sincronizados - Defasagem de 90 graus  
Linha de 138 KV – Falta AT

Observa-se pela FIG. 6.22 que, estando os dados sincronizados, os algoritmos apresentam erros pequenos (menores que 1,5%), sendo que o método de Johns teve melhor desempenho. É necessário ressaltar que, nas equações do método de Johns, estão presentes as correções hiperbólicas e, no LocMod, considerou-se o modelo impedância série da linha.

Na FIG. 6.23, pode-se notar que, estando os dados não sincronizados, com uma diferença de fase de 45 graus, os resultados do método de Johns apresentaram erros de mais de 25%, enquanto o LocMod manteve o desempenho para dados sincronizados. Na FIG. 6.24, com a diferença de fase aumentada para 90 graus, percebe-se de forma mais evidente o melhor desempenho do LocMod. É importante considerar que, para o método de Johns, é possível fazer a sincronização nos dados, conforme item 4.7 do capítulo 4, de forma que não ocorram os erros mostrados nas FIG. 6.23 e 6.24. Neste caso, deverá haver um número suficiente de amostras pré-falta para que se execute o procedimento.

Nas FIG. 6.25 e 6.26, têm-se os erros da aplicação dos algoritmos de Johns e LocMod para a linha de 138 kV submetida a faltas bifásicas tipo BC e trifásica. Os erros foram pequenos, mas, como se observou no caso AT, as correções hiperbólicas do

algoritmo de Johns possibilitaram melhores resultados. Para a linha de 345 kV, com 400 km de extensão, submetida a faltas AT, BC e ABC, observa-se que os erros das FIG. 6.27, 6.28 e 6.29 aumentaram bastante em relação à linha de 200 km, em função do modelo de linha curta do LocMod.

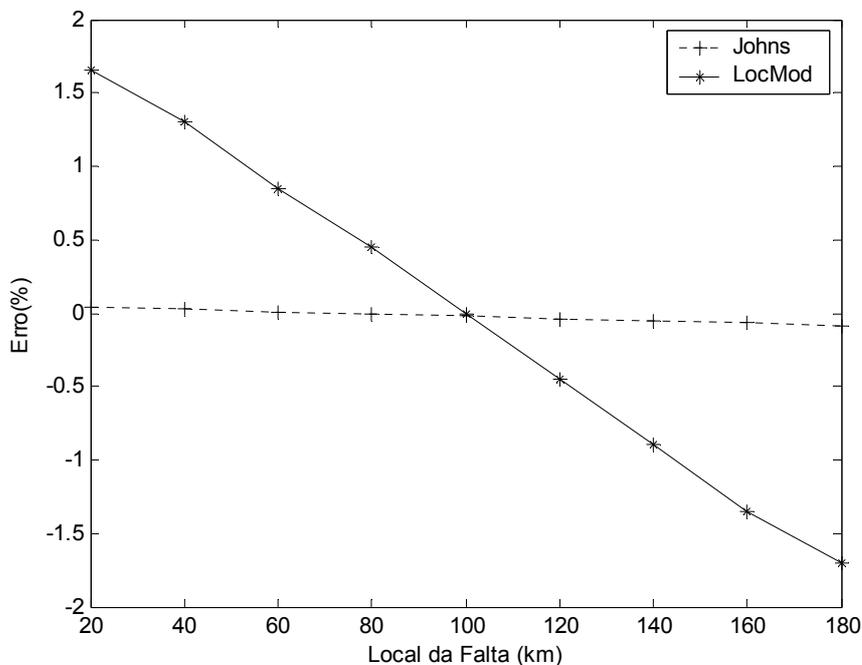


FIGURA 6.25 – Erros de localização – Dados Sincronizados - Linha de 138 KV - Falta BC

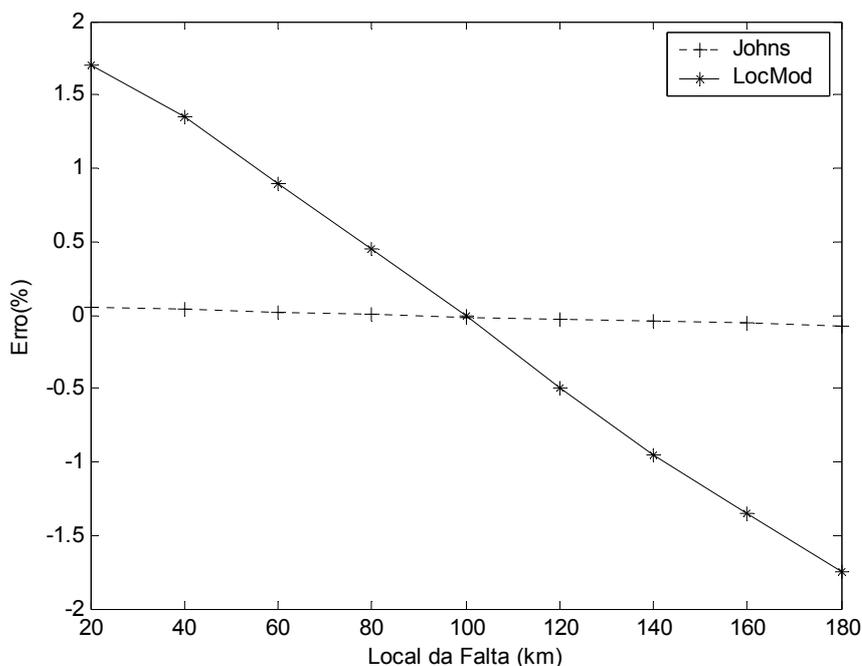


FIGURA 6.26 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Linha de 138 KV - Falta ABC

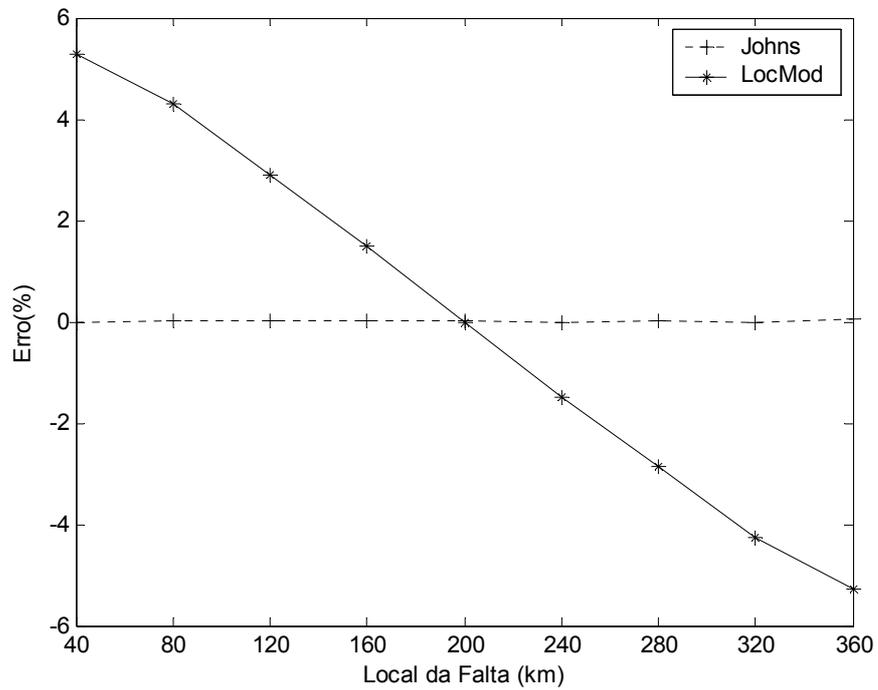


FIGURA 6.27 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Falta AT – Linha de 345 KV

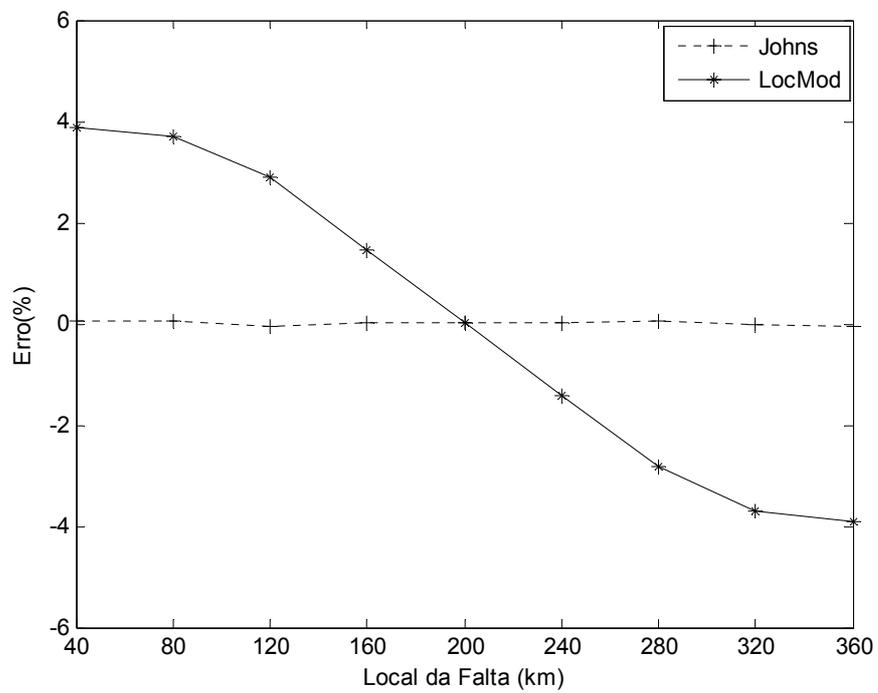


FIGURA 6.28 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Falta BC – Linha de 345 KV

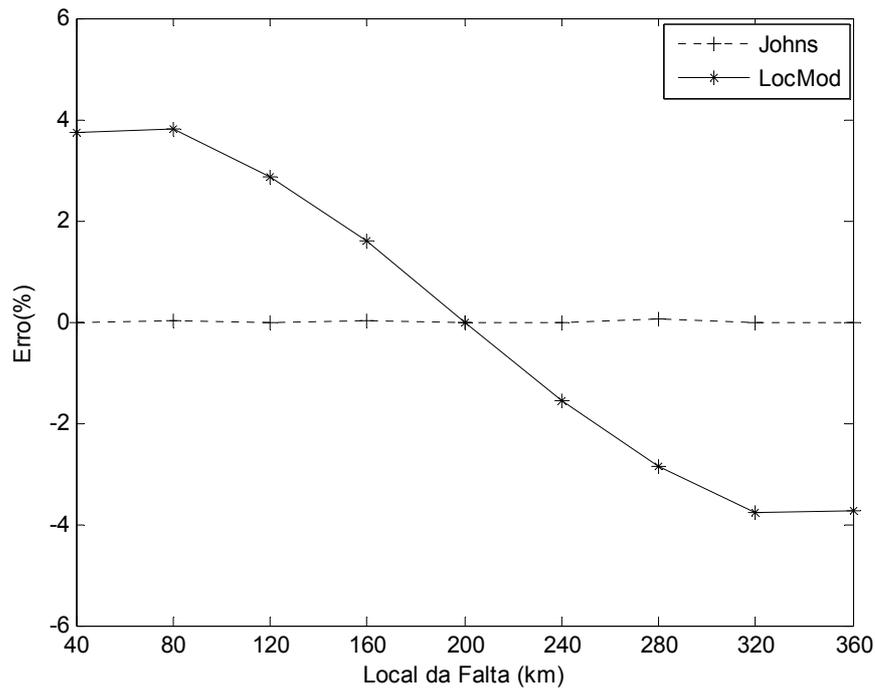


FIGURA 6.29 – Erros de localização – Dados Sincronizados – Falta ABC – Linha de 345 KV

Na TAB. 6.6, apresentam-se os resultados de localização para casos reais de curto-circuito do sistema elétrico brasileiro, aplicando-se os algoritmos de Johns, Jan & Rafal [30], que não necessitam de sincronismo nos dados, e de LocMod. Na primeira situação, os dados são sincronizados pela corrente pré-falta. Em seguida, mostram-se os resultados obtidos, utilizando os arquivos de dados conforme gravados pelos registradores, sem o procedimento de sincronização. Os erros encontram-se na TAB. 6.7.

Pode-se observar, nas TAB. 6.6 e 6.7, que o método de Johns sofreu uma influência significativa nos resultados, quando se aplicaram os dados não sincronizados, enquanto, nos métodos LocMod e Jan & Rafal, os locais das faltas são os mesmos para as duas situações. O erro médio apresentado pelo LocMod é ligeiramente menor, sendo importante destacar a sua simplicidade e o pequeno esforço computacional necessário na sua utilização.

TABELA 6.6 – Localização de falhas reais – LocMod (linha curta)

LT	Extensão (km)	Falta	Local (km)	R <sub>F</sub> (Ohms)	Local Estimado Dados Sincronizados (km)			Local Estimado Dados Não Sincronizados (km)		
					LocMod Curta	Johns	Jan& Rafal	LocMod Curta	Johns	Jan, Rafal
1	74,4	AT	60,0	4,3	63,9	64,4	64,2	63,9	64,4	64,2
		BT	54,0	3,8	54,0	54,3	54,2	54,0	31,2	54,2
2	105,6	AT	30,0	23,9	32,4	29,9	32,4	32,4	32,5	32,4
3	356,3	AT	127,0	17,9	131,2	130,0	126,5	131,2	200,0	126,5
4	342,7	CT	317,0	1,6	320,0	324,0	323,1	320,0	-- <sup>(1)</sup>	323,1
		AT	76,0	1,7	85,2	83,5	83,4	85,2	40,9	83,4
		CT	55,0	25,3	59,5	56,8	56,7	59,5	47,9	56,7
5	248,4	AT	223,0	2,4	227,3	233,0	231,3	227,3	232,0	231,3
		ACT	157,0	1,4	152,2	154,0	153,1	152,2	-- <sup>(1)</sup>	153,1
6	219,2	BT	218,0	1,3	217,9	216,0	219,2	217,9	-- <sup>(1)</sup>	219,2

TABELA 6.7 – Erro percentual para localização de falhas reais - LocMod (linha curta)

LT	Tensão Nominal (kV)	Extensão (km)	Erro (%) Dados Sincronizados			Erro (%) Dados Não Sincronizados		
			LocMod Curta	Johns	Jan, Rafal	LocMod Curta	Johns	Jan, Rafal
1	345	74,4	5,24	5,91	5,65	6,50	5,91	5,65
			0,00	0,56	0,27	0,00	30,65	0,27
2	500	105,6	2,27	-0,09	2,27	2,26	2,36	2,27
3	500	356,3	1,19	0,84	-0,39	1,19	20,49	-0,39
4	500	342,7	0,88	2,04	1,78	0,88	-- <sup>(1)</sup>	1,78
			2,68	2,19	2,16	2,68	-10,24	2,16
			1,31	0,53	0,50	1,31	-2,07	0,50
5	500	248,4	1,73	4,03	3,34	1,73	3,62	3,34
			-1,93	-1,21	-1,57	-1,93	-- <sup>(1)</sup>	-1,57
6	500	219,2	-0,06	-0,91	0,55	-0,06	-- <sup>(1)</sup>	0,55
Erro médio <sup>(2)</sup>			1,73	1,83	1,85	1,73	10,76	1,85

<sup>(1)</sup> Local fora dos limites da linha

<sup>(2)</sup> Para locais dentro dos limites da linha e considerando o módulo dos erros

### 6.3.2 – Modelo de Linha Longa

Considerando o circuito superposto da FIG. 6.3(c), a tensão no ponto de falta, calculada a partir dos terminais S e R, é dada por

$$\begin{aligned} V_{FS} &= \cosh(\gamma x)V_S'' - Z_C \sinh(\gamma x)I_S'' \\ V_{FR} &= \cosh(\gamma x)V_R'' - Z_C \sinh(\gamma x)I_R'' \end{aligned} \quad (6.33)$$

onde  $Z_C$  é a impedância característica e  $\gamma$  é a constante de propagação, ambas de seqüência positiva. Os valores superpostos de seqüência positiva  $V_S''$ ,  $I_S''$ ,  $V_R''$  e  $I_R''$  são dados por

$$\begin{aligned} V_S'' &= V_S - V_S' \\ V_R'' &= V_R - V_R' \end{aligned} \quad (6.34)$$

$$\begin{aligned} I_S'' &= I_S - I_S' \\ I_R'' &= I_R - I_R' \end{aligned} \quad (6.35)$$

A distância ao ponto de falta é calculada através da função

$$F(x) = \left| |V_{FS}(x)| - |V_{FR}(x)| \right| \quad (6.36)$$

onde o local da falta pode ser encontrado por

$$Local = Min[F(x)] \quad (6.37)$$

A equação (6.36) contém apenas uma variável desconhecida  $x$ , fasores estimados e constantes obtidas dos parâmetros da linha. Como a solução é determinada a partir dos módulos das tensões no ponto de falta, não é necessário que os fasores de tensão e corrente estejam sincronizados no tempo, mas apenas que se definam os períodos pré e pós falta das ondas de entrada. Logo, o processo de localização pode ser realizado sem o sincronismo dos relógios dos registradores local e remoto ou até mesmo nos casos em que há o registro com perda de sincronismo. Para resolver a equação (6.37), armazenou-se o histórico de  $F(x)$ , obtido variando-se  $x$  de 0,1 em 0,1 km até o comprimento da linha. O valor de  $x$  que fornece o ponto de mínimo de  $F(x)$  é o local da falta procurado.

Para analisar o desempenho do método, foram aplicados ao modelo de linha longa os mesmos arquivos do PSCAD testados no modelo de linha curta da linha de 138 kV. No

gráfico da FIG. 6.30, mostram-se os valores estimados da distância ao ponto de falta, ao longo do tempo, para uma falta fase-terra, a 120 km do terminal local da linha, a partir de um ciclo de falta. Há uma rápida convergência, com pequenas variações entre iterações, sendo verificada a estabilidade do método.

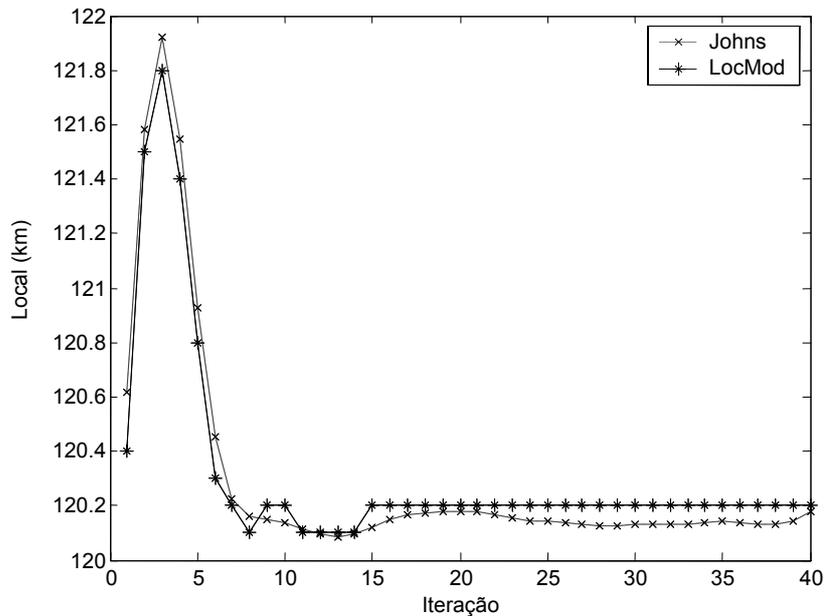


FIGURA 6.30 – Evolução das estimativas para uma falta AT a 120 km do terminal local.

Nas FIG. 6.31 e 6.32, apresentam-se os resultados da aplicação dos algoritmos de Johns e LocMod (linha longa), para faltas fase-terra com resistências de falta de 20 e 100 ohms, sendo os dados obtidos de forma sincronizada. O comportamento das curvas e a ordem de grandeza dos erros são semelhantes para os dois algoritmos de localização. O valor da resistência de falta pouco interfere nos resultados, evidenciando-se a independência dos métodos em relação a esta variável, uma das vantagens dos algoritmos que utilizam dados de dois terminais.

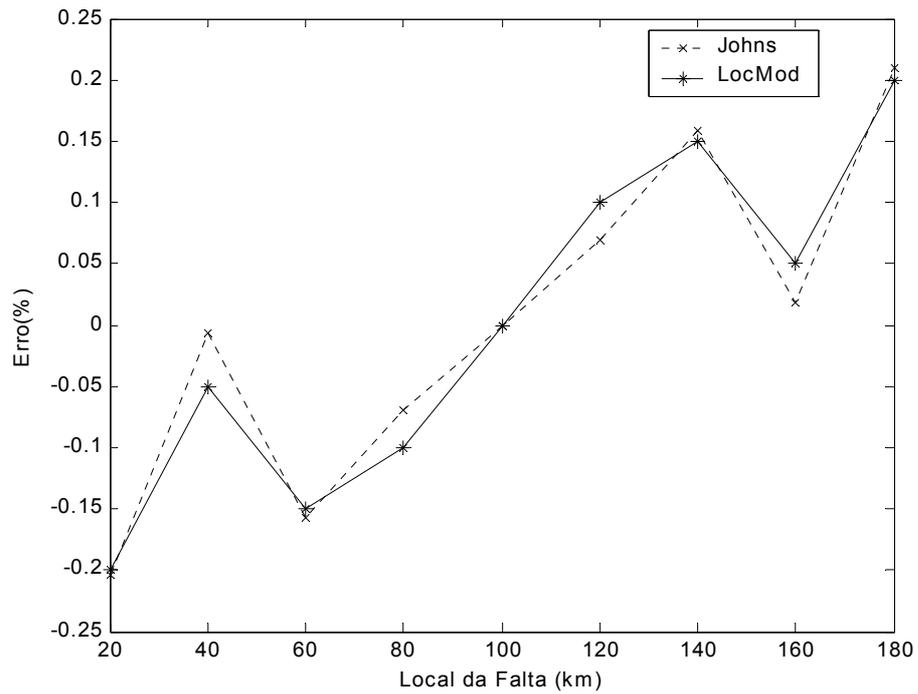


FIGURA 6.31 – Erros de localização para faltas AT com  $R_F = 20$  ohms – Linha de 138 KV

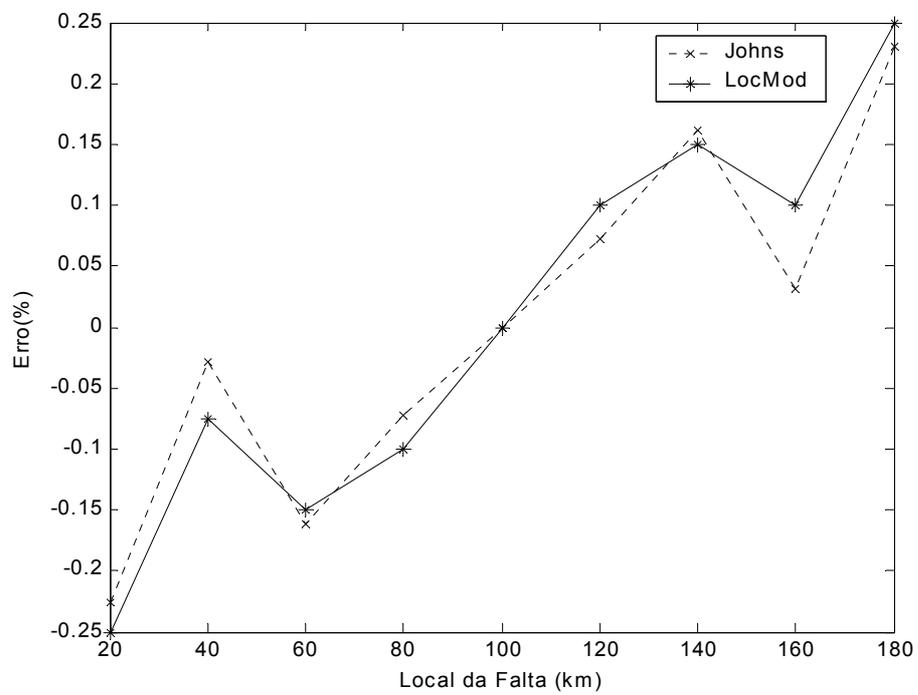


FIGURA 6.32 – Erros de localização para faltas AT com  $R_F = 100$  ohms – Linha de 138 KV

Na obtenção dos erros mostrados na FIG. 6.33, provocou-se erro de fase de 45 graus nos fasores do terminal remoto e foram aplicados os dois algoritmos para a comparação dos resultados, nos casos de curto-circuito com resistência de falta de 100 ohms. Verifica-se a imunidade do algoritmo proposto ao erro de fase.

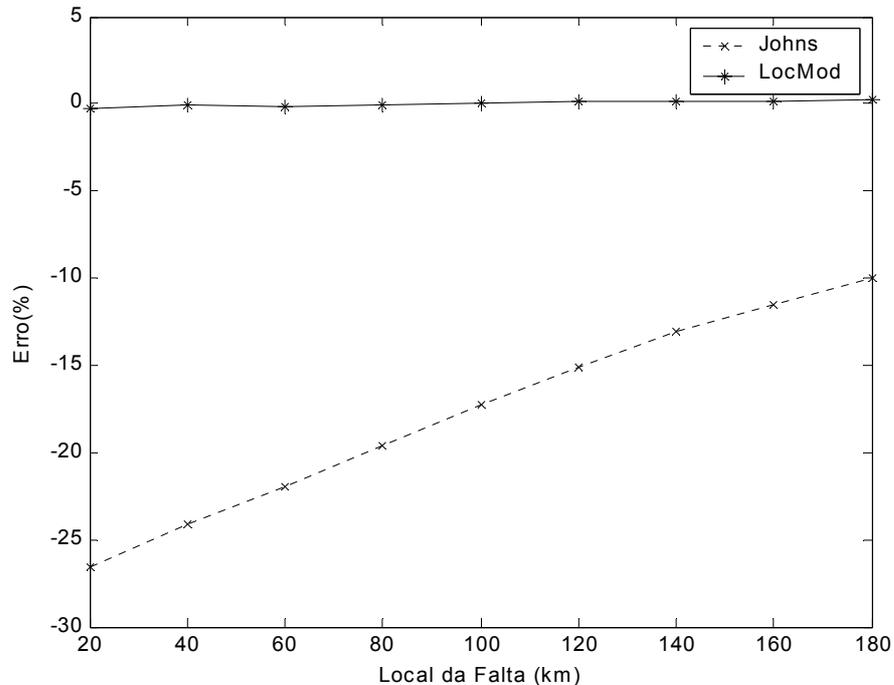


FIGURA 6.33 – Erros de localização para faltas AT e fase dos fasores remotos deslocada de 45 graus - Linha de 138 KV

Nas FIG. 6.34 e 6.35, têm-se os erros para as faltas BC e ABC, obtidos com o modelo de linha longa e comparados com o algoritmo de Johns. Observa-se que os erros foram semelhantes. Para a linha de 345 KV, os erros para as faltas AT, BC e ABC são mostrados nas FIG. 6.36, 6.37 e 6.38. Observa-se a redução dos erros, com a aplicação do modelo de linha longa do LocMod, se comparados aos valores obtidos nas FIG. 6.22, 6.23 e 6.24.

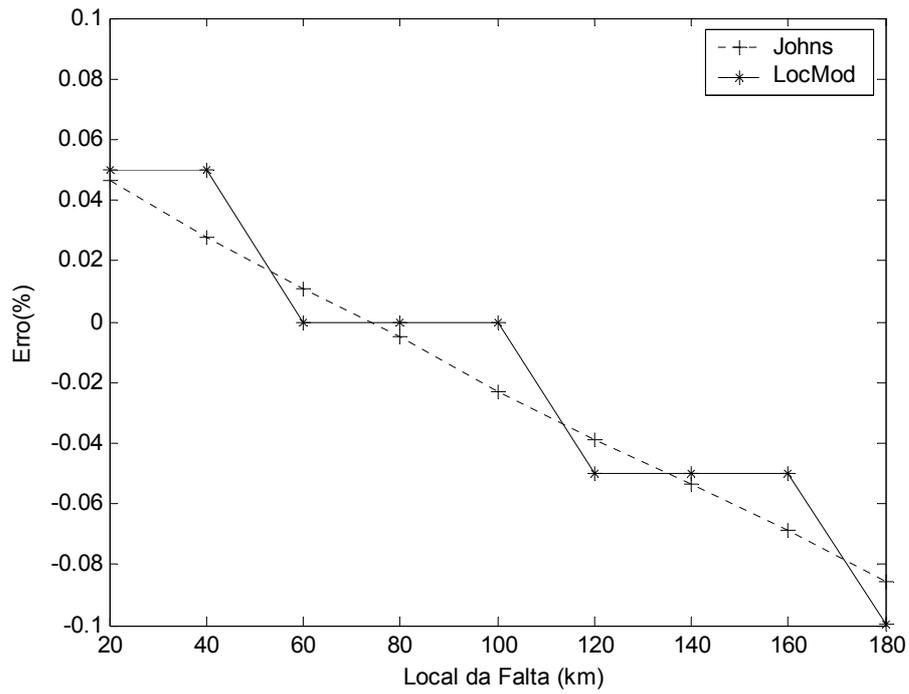


FIGURA 6.34 – Erros de localização para faltas BC – Linha de 138 KV

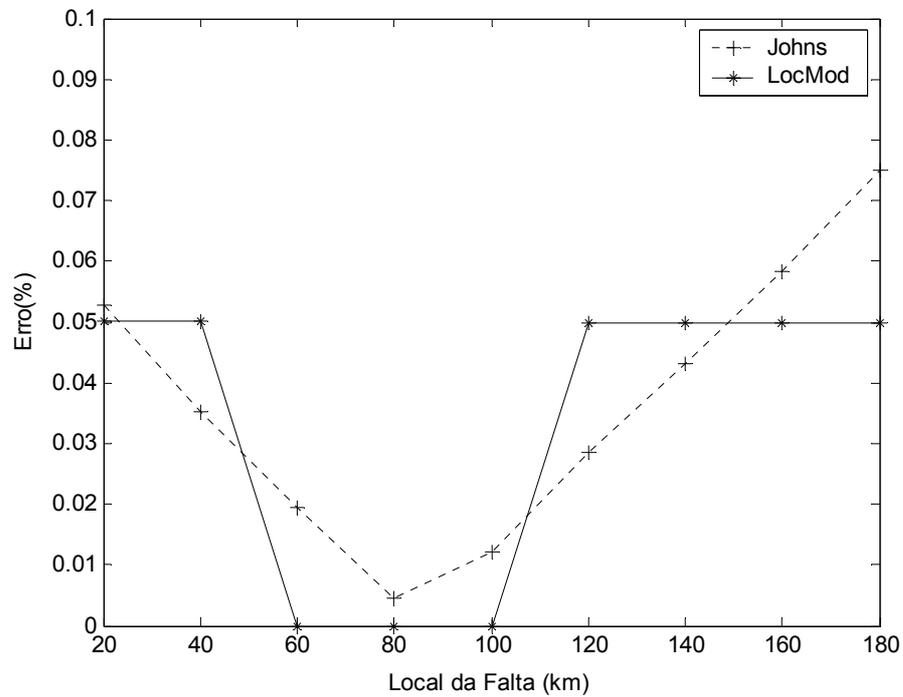


FIGURA 6.35 – Erros de localização para faltas ABC – Linha de 138 KV

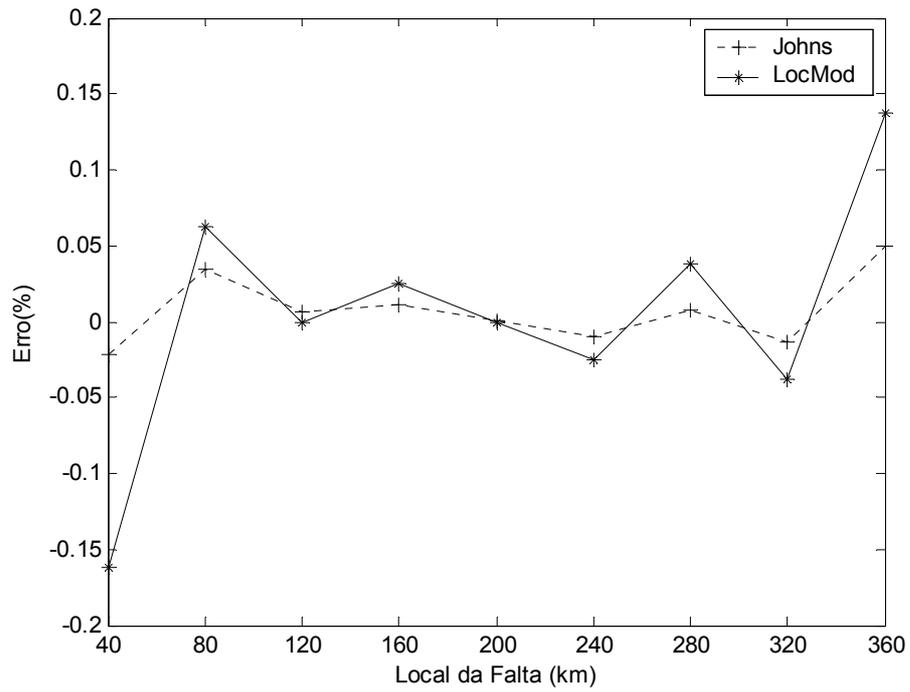


FIGURA 6.36 – Erros de localização para faltas AT – Linha de 345 KV

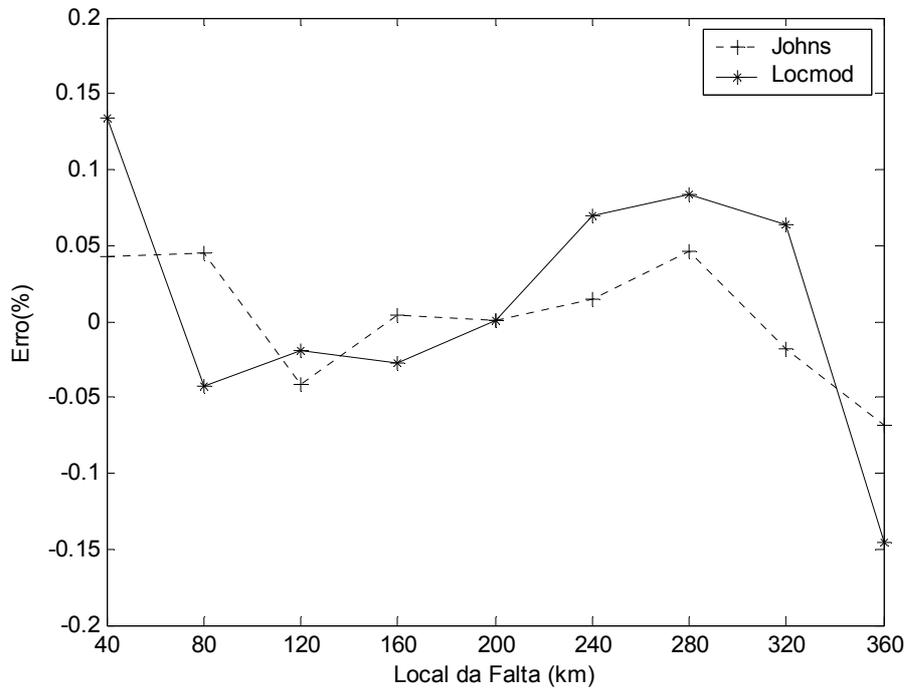


FIGURA 6.37 – Erros de localização para faltas BC – Linha de 345 KV

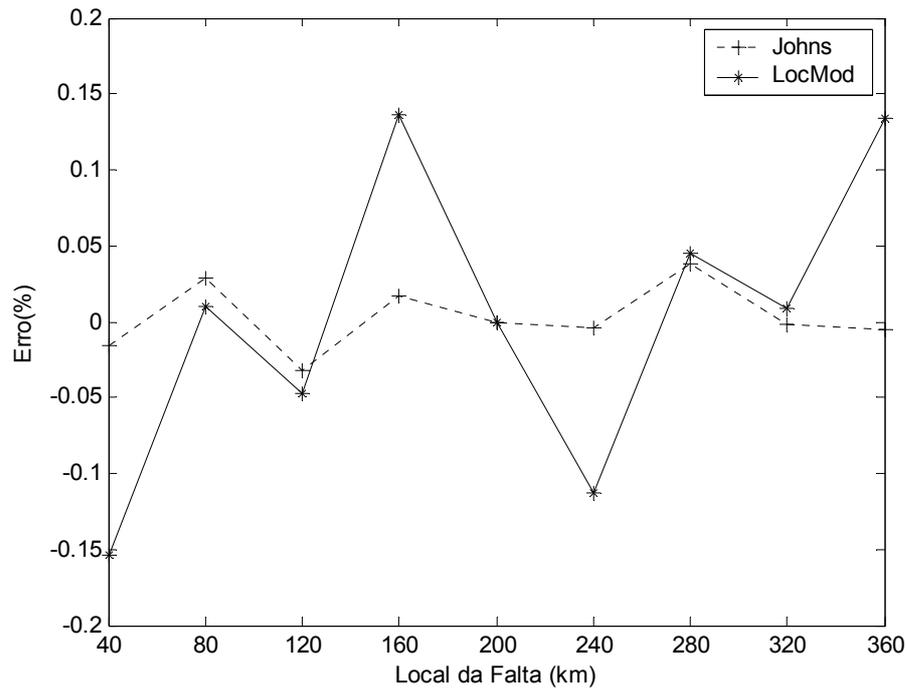


FIGURA 6.38 – Erros de localização para faltas ABC – Linha de 345 KV

Ao LocMod para o modelo de linha longa foram aplicados os mesmos arquivos de faltas reais da TAB. 6.6. Na TAB.6.8, têm-se os resultados para dados sincronizados e não sincronizados dos algoritmos de Johns, Jan & Rafal e LocMod para linha curta e longa e, na TAB. 6.9, têm-se os erros obtidos. Observa-se que o LocMod com formulação para linha longa obteve um desempenho satisfatório, se comparado ao algoritmo de Johns, para a situação de sincronismo nos dados. Já os modelos de linha curta e longa do LocMod apresentaram erros médios semelhantes, o que mostra que, nos casos práticos, as correções hiperbólicas terão uma maior importância para linhas longas, como nos casos 3 e 4, em que, considerando as capacitâncias na formulação do algoritmo, houve melhor desempenho em 3 das 4 faltas analisadas.

TABELA 6.8 – Localização de falhas reais – LocMod (linha longa)

LT	Extensão (km)	Falta	Local (km)	R <sub>F</sub> (Ohms)	Local Estimado Dados Sincronizados (km)			Local Estimado Dados Não Sincronizados (km)		
					LocMod longa	Johns	Jan & Rafal	LocMod longa	Johns	Jan, Rafal
1	74,4	AT	60,0	4,3	63,8	64,4	64,2	63,8	64,4	64,2
		BT	54,0	3,8	54,2	54,3	54,2	54,2	31,2	54,2
2	105,6	AT	30,0	23,9	32,4	29,9	32,4	32,4	32,5	32,4
3	356,3	AT	127,0	17,9	129,8	130,0	126,5	129,8	200,0	126,5
4	342,7	CT	317,0	1,6	323,3	324,0	323,1	323,3	-- <sup>(1)</sup>	323,1
		AT	76,0	1,7	83,3	83,5	83,4	83,3	40,9	83,4
		CT	55,0	25,3	56,8	56,8	56,7	56,8	47,9	56,7
5	248,4	AT	223,0	2,4	231,3	233,0	231,3	231,3	232,0	231,3
		ACT	157,0	1,4	154,2	154,0	153,1	154,2	-- <sup>(1)</sup>	153,1
6	219,2	BT	218,0	1,3	219,1	216,0	219,2	219,1	-- <sup>(1)</sup>	219,2

TABELA 6.9 – Erro percentual para localização de falhas reais - LocMod (linha longa)

LT	Tensão Nominal (kV)	Extensão (km)	Erro (%) Dados Sincronizados				Erro (%) Dados Não Sincronizados			
			LocMod Curta	LocMod Longa	Johns	Jan, Rafal	LocMod Curta	LocMod Longa	Johns	Jan, Rafal
1	345	74,4	5,24	5,11	5,91	5,65	5,24	5,11	5,91	5,65
			0,00	0,27	0,56	0,27	0,00	0,27	30,65	0,27
2	500	105,6	2,27	2,26	-0,09	2,27	2,27	2,26	2,36	2,27
3	500	356,3	1,19	0,79	0,84	-0,39	1,19	0,79	20,49	-0,39
4	500	342,7	0,88	1,84	2,04	1,78	0,88	1,84	-- <sup>(1)</sup>	1,78
			2,68	2,13	2,19	2,16	2,68	2,13	-10,24	2,16
			1,31	0,53	0,53	0,50	1,31	0,53	-2,07	0,50
5	500	248,4	1,73	3,34	4,03	3,34	1,73	3,34	3,62	3,34
			-1,93	-1,13	1,21	-1,57	-1,93	-1,13	-- <sup>(1)</sup>	-1,57
6	500	219,2	-0,06	-0,50	-0,91	0,55	-0,06	-0,50	-- <sup>(1)</sup>	0,55
Erro médio (%) <sup>(2)</sup>			1,73	1,79	1,83	1,85	1,73	1,79	10,73	1,85

<sup>(1)</sup> Local fora dos limites da linha

<sup>(2)</sup> Para locais dentro dos limites da linha e considerando o módulo dos erros

### 6.3.3 – Modelo de Linha Longa – Domínio de fases

A formulação do LocMod para o domínio de fases foi aplicada aos casos reais de curto-circuito, considerando as matrizes de entrada de impedâncias e admitâncias do algoritmo, para as linhas perfeitamente transpostas. Na TAB. 6.10, têm-se os resultados para os dados não sincronizados, tendo sido escolhida a fase em falta para indicar o local. Os erros foram semelhantes aos alcançados pelo método de Johns, no domínio de fases, na TAB. 5.5 do capítulo 5, porém, maiores, quando comparados aos obtidos pelo método no domínio modal.

TABELA 6.10 – Localização de faltas reais – LocMod no domínio de fases

LT	Tensão Nominal (kV)	Extensão (km)	Falta	Local (km)	$R_F$ (ohms)	Local Estimado Dados Não Sincronizados (km)	Erro (%)
1	345	74,4	AT	60,0	4,3	65,5	7,39
			BT	54,0	3,8	56,5	3,36
2	500	105,6	AT	30,0	23,9	27,3	-2,56
3	500	356,3	AT	127,0	17,9	121,3	-1,60
4	500	342,7	CT	317,0	1,6	319,1	0,61
			AT	76,0	1,7	88,6	3,68
			CT	55,0	25,3	60,9	1,72
5	500	248,4	AT	223,0	2,4	235,0	4,83
			ACT	157,0	1,4	157,3	0,12
6	500	219,2	BT	218,0	1,3	217,7	-0,14
Erro médio (%) <sup>(1)</sup>							2,60

<sup>(1)</sup> Considerando o módulo dos erros

## 6.4 – Método de Dois Terminais Para Linhas de Circuito Duplo Não Transpostas

Existem na literatura alguns métodos propostos para a localização de falhas em linhas de circuito duplo [53], que buscam considerar o acoplamento entre os circuitos. De forma a procurar reduzir o erro de localização nestas aplicações, considerando também a linha não transposta, é proposta uma técnica, para as linhas que mantenham a distância entre os circuitos ao longo de sua extensão, conforme FIG. 6.39(a). O método baseia-se na diagonalização das matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$ , que, no caso de circuito duplo trifásico, é da ordem  $6 \times 6$ . Assim, de forma semelhante à feita no algoritmo de Johns, escolhe-se, da linha em falta, um modo para proceder à localização.

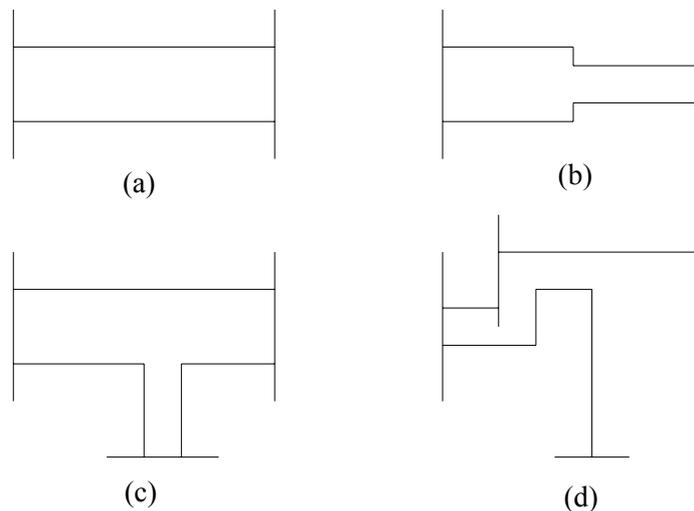


FIGURA 6.39 – Configurações de linhas com circuitos em paralelo

$$[Z_m] = [T_v]^{-1} [Z] [T_l] \quad (6.38)$$

$$[Y_m] = [T_l]^{-1} [Y] [T_v] \quad (6.39)$$

Considerando a linha perfeitamente transposta e a matriz  $[Q]$  de componentes simétricas, a matriz  $[Z_m]$  é da forma

$$[Z_m] = \begin{bmatrix} [Q]^{-1} & 0 \\ 0 & [Q]^{-1} \end{bmatrix} [Z] \begin{bmatrix} [Q] & 0 \\ 0 & [Q] \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

$$[Z_m] = \begin{bmatrix} Z_{01} & 0 & 0 & Z_{0m} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{21} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{0m} & 0 & 0 & Z_{02} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (6.41)$$

onde  $Z_{0m}$  é a impedância mútua de seqüência zero.

Nas FIG. 6.40 e 6.41, têm-se os erros da localização para faltas AT aplicadas ao longo da linha de circuito duplo de 138 kV do anexo, com extensões de 100 e 200 km, considerando-as perfeitamente transpostas.

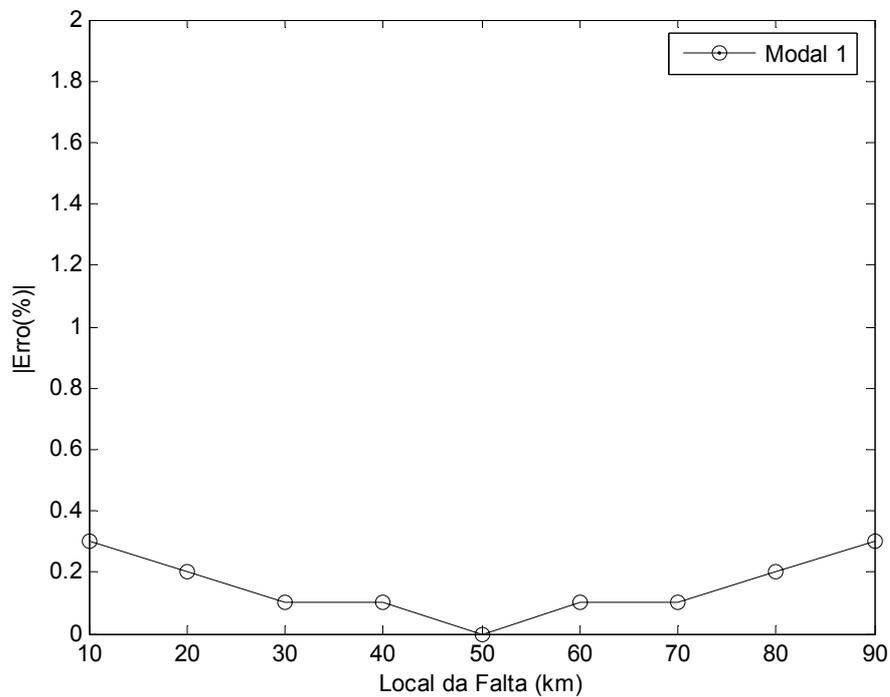


FIGURA 6.40 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 100 km perfeitamente transposta

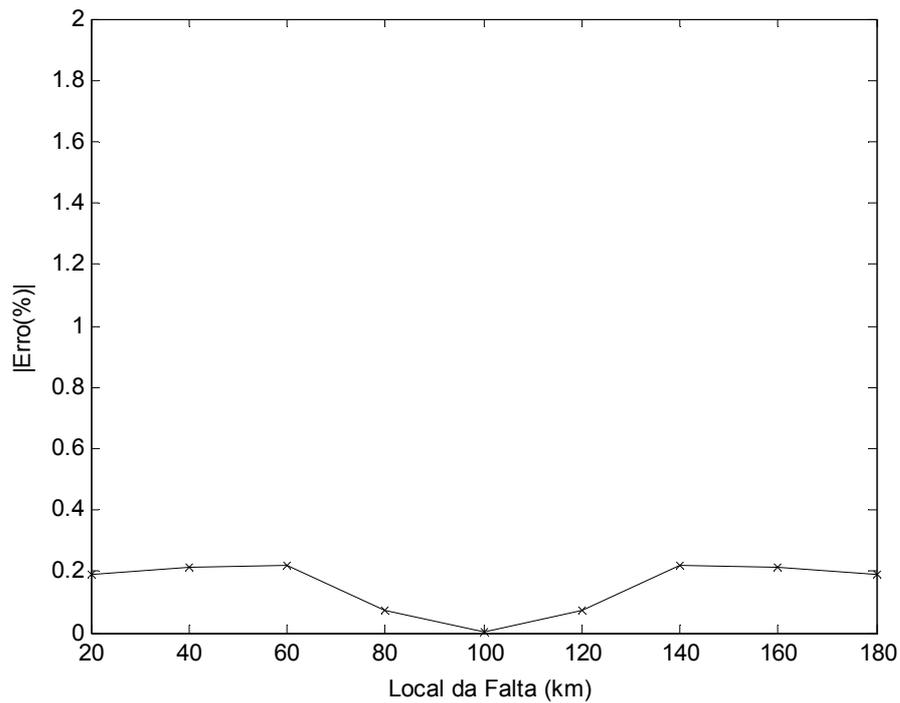


FIGURA 6.41 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 200 km perfeitamente transposta

De forma a verificar o efeito da transposição, a linha de 138 kV é simulada como não transposta, com as extensões de 100 e 200 km. As matrizes de parâmetros  $[Z]$  e  $[Y]$  de entrada no algoritmo são para a linha perfeitamente transposta. Nas FIG. 6.42 e 6.43, têm-se os resultados.

Observa-se que, ao se proceder à localização de uma linha de circuito duplo não transposta como se fosse perfeitamente transposta, há uma elevação significativa nos erros.

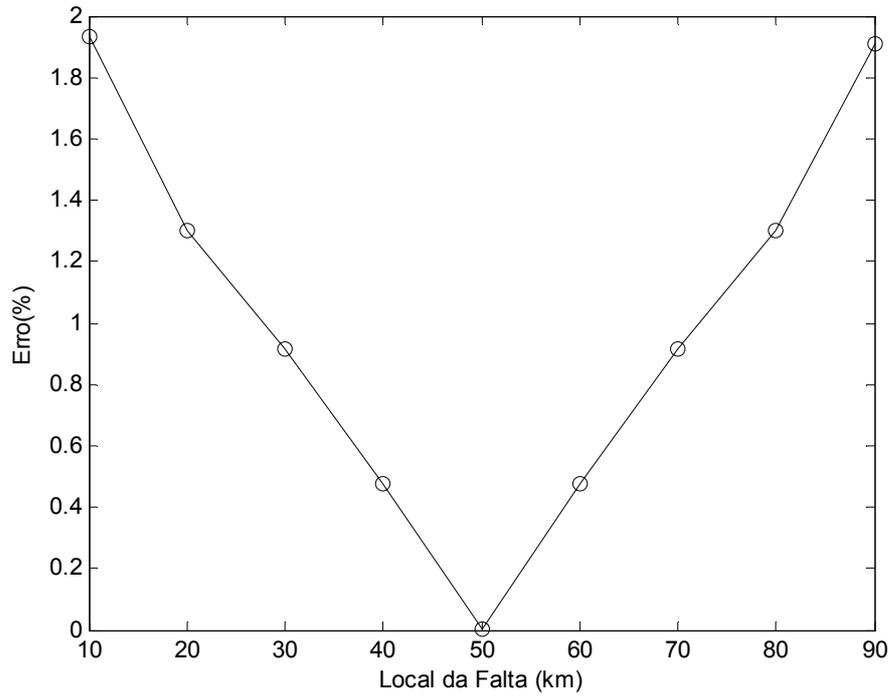


FIGURA 6.42 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 100 km não transposta Matrices  $[Z]$  e  $[Y]$  para a linha perfeitamente transposta

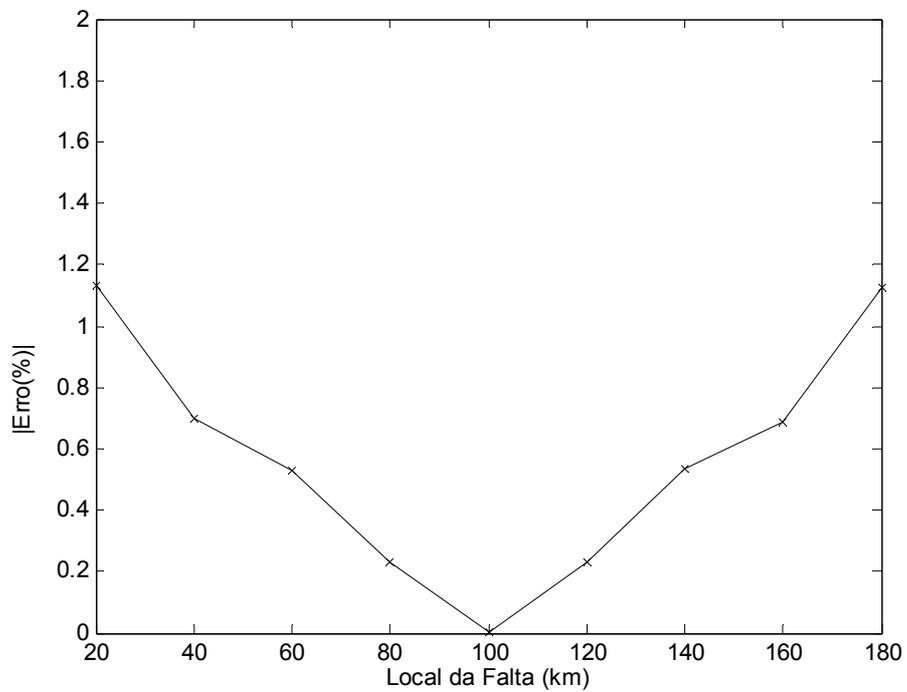


FIGURA 6.43 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 200 km não transposta Matrices  $[Z]$  e  $[Y]$  para a linha perfeitamente transposta

De forma a procurar reduzir os erros, utilizou-se o localizador, considerando a linha como não transposta. Assim, aplicaram-se as matrizes de transformação  $[T_V]$  e  $[T_I]$ , diagonalizando  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$ , através de rotina do MATLAB. Nos resultados que estão nas FIG. 6.44 e 6.45, pode-se ver que os erros devido a não-transposição da linha foram eliminados, havendo uma melhora importante no desempenho do localizador de faltas.

Os resultados mostraram que a utilização de algoritmos que diagonalizem as matrizes de uma linha de circuito duplo, mesmo sendo de menor extensão, melhoram a precisão na localização de faltas.

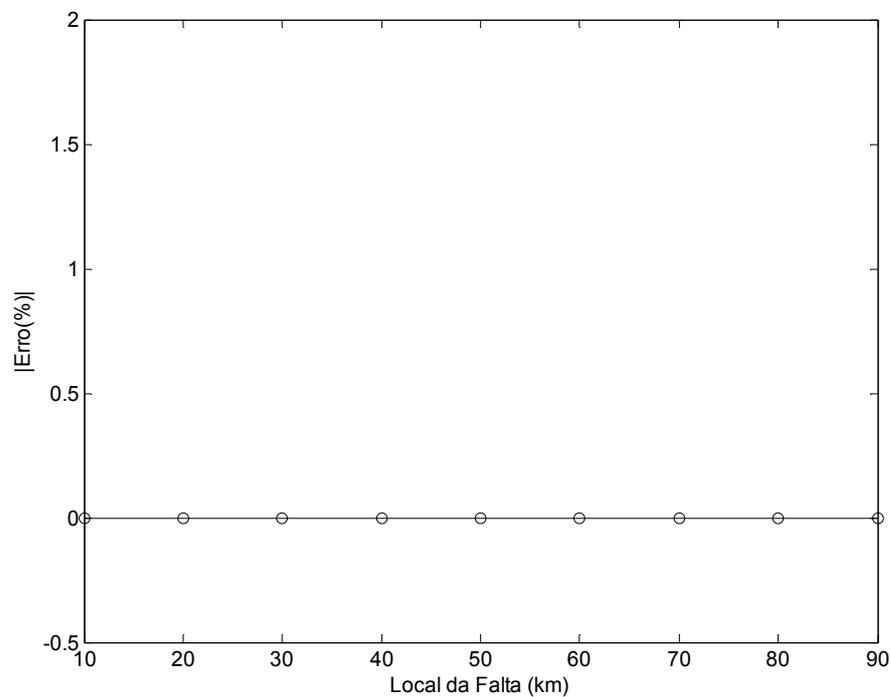


FIGURA 6.44 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 100 km não transposta  
Matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  para a linha não transposta

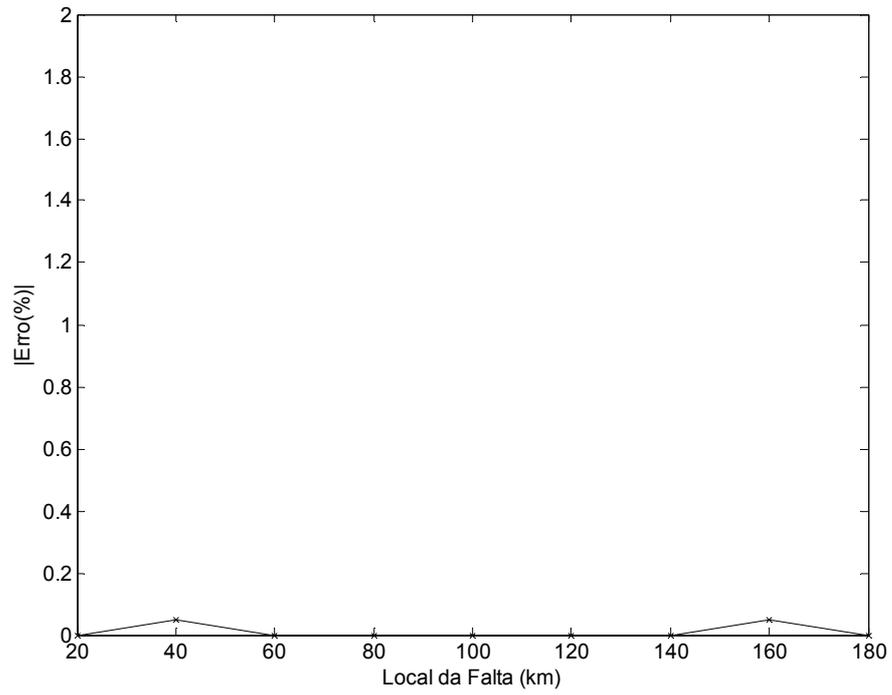


FIGURA 6.45 – Erros de localização para a linha de circuito duplo de 200 km não transposta  
Matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  para a linha não transposta

# 7 O PROGRAMA SISLOC-T

O programa Sisloc-T é um sistema computacional, desenvolvido em linguagem de programação C++, com a filosofia de orientação a objetos e interfaces, que tem como objetivos facilitar a manipulação de dados e criar um ambiente favorável para a tarefa de localização de faltas. Através de um arquivo aplicativo, é possível executar as rotinas que vão desde a entrada de dados até o objetivo principal, que é o local da falta, na linha de transmissão em análise. No Sisloc-T, há uma separação entre a interface do programa e o controle e processamento de dados, como ilustra a FIG. 7.1.

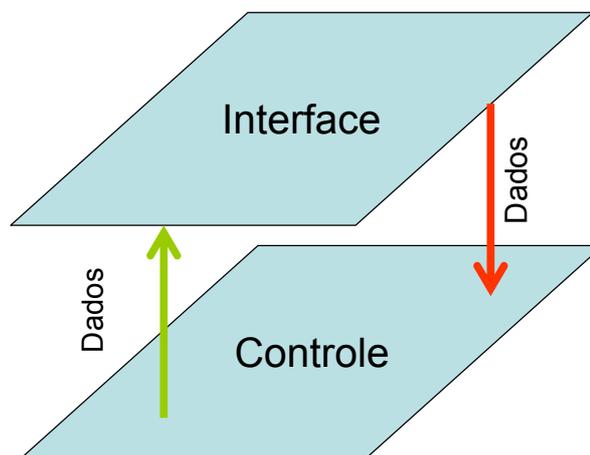


FIGURA 7.1 – Arquitetura visão controle

## 7.1 – Interface de Dados

Na FIG. 7.2, apresenta-se a interface principal do SISLOC-T, que precede a localização de faltas, sendo responsável pelo processamento dos dados e por disponibilizá-los de forma adequada à fase posterior. É possível ao operador, selecionar as opções necessárias para o adequado funcionamento do programa. Nesta região são apresentados gráficos com as amostras temporais coletadas pelo oscilógrafo digital, das tensões e correntes nos terminais da linha de transmissão. Ao lado de cada canal estão presentes informações como sua identificação, o valor atual da amostra selecionada, a unidade de medida e os valores superior e inferior. Também são apresentados os canais

digitais do equipamento, que mostram a atuação dos dispositivos de proteção durante o evento. Os pontos D1 a D7 assinalados servirão para explicar como se procede a sua utilização, além de exibir suas funcionalidades.

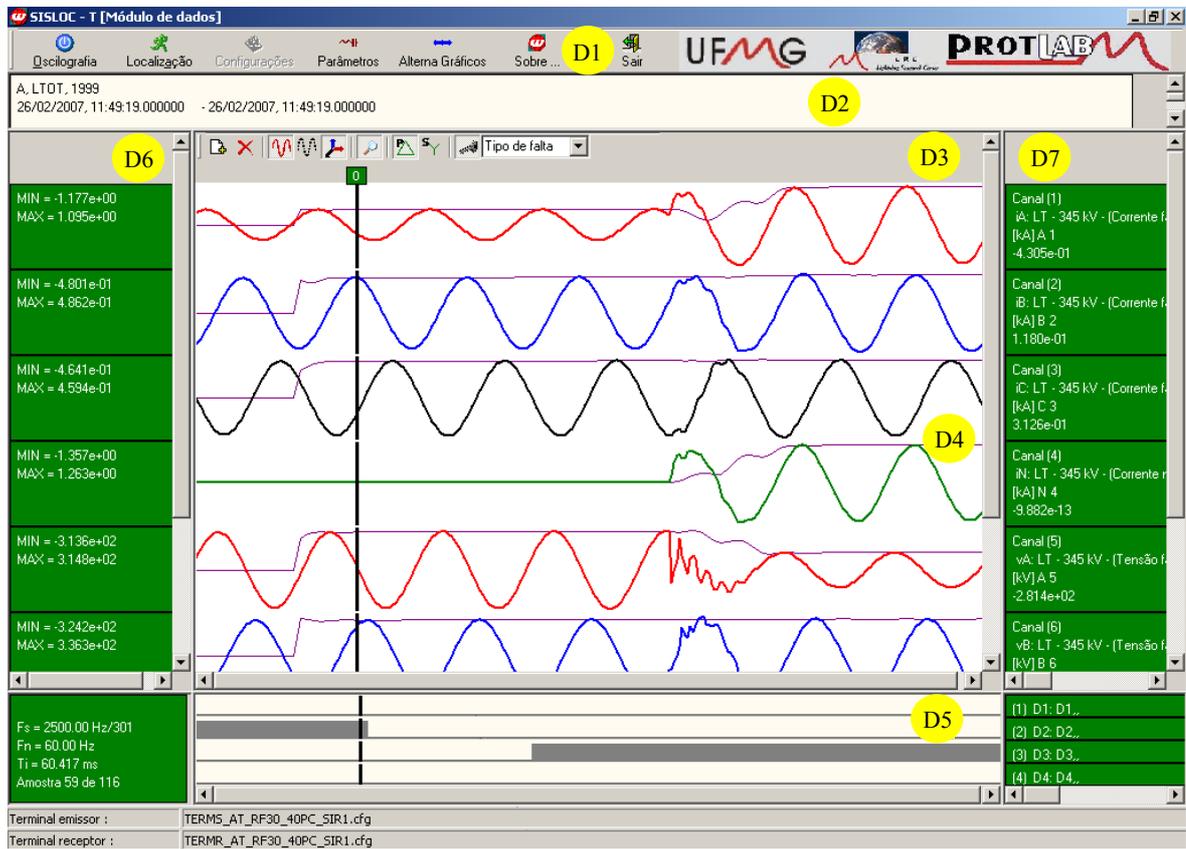


FIGURA 7.2 – Formulário do módulo de pré-localização

### 7.1.1 - Seleção do algoritmo

Inicialmente, faz-se a escolha do número de terminais e do algoritmo a ser utilizado na localização da falta. Estas opções podem ser feitas no botão “*Configurações*” da barra de ferramentas principal, indicada em D1, e que acessa o formulário da FIG. 7.3.

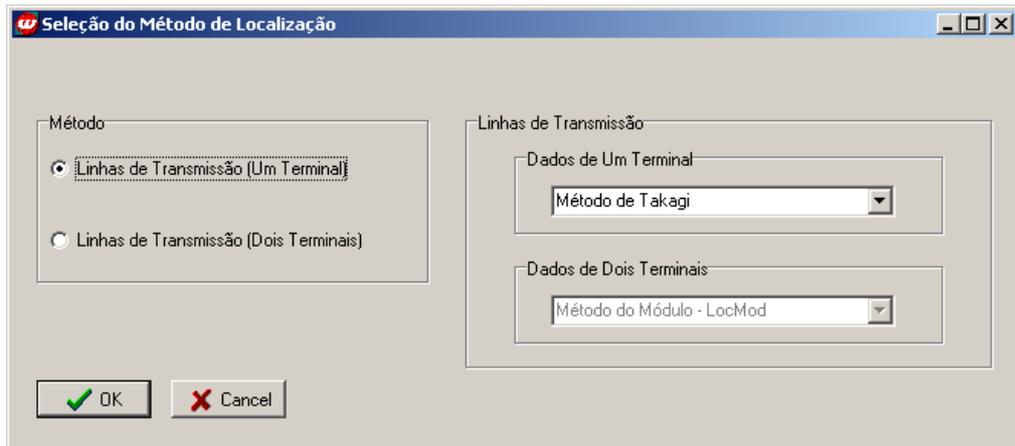


FIGURA 7.3 – Seleção do método de localização

### 7.1.2 - Entrada de Dados

O SISLOC-T foi concebido para a análise de dados provenientes de programas para simulação de transitórios eletromagnéticos, como o EMTP (Electromagnetic Transients Program) e ATP (Alternative Transients Program), e também para dados reais. Como cada *software* de simulação possui sua própria formatação para os arquivos de saída, optou-se por convertê-los para um formato padrão ASCII único. Este formato disponibiliza as amostras de corrente e tensão, convenientemente arranjadas em colunas, para seu posterior processamento pelo módulo de pré-localização.

Os dados reais são obtidos através dos oscilógrafos digitais, como relés digitais e registradores digitais de perturbações, instalados nos terminais das linhas de transmissão. Atualmente, estes equipamentos já adotam o padrão estabelecido pela norma COMTRADE [37] para o registro das oscilografias.

O arquivo COMTRADE é composto, essencialmente, por três arquivos. O arquivo de configuração (.CFG) contém informações sobre cada canal do equipamento, seja digital ou analógico. Este arquivo possibilita a interpretação dos dados amostrados, os quais estão codificados, em ASCII ou binário, em outro arquivo de mesmo nome, de extensão .DAT. O terceiro arquivo, o de cabeçalho e extensão .HDR, é configurável pelo operador, podendo conter uma série de informações como código do fabricante, localidade, parâmetros da linha, endereços dos canais.

Assim, a localização de uma falta real no SISLOC-T inicia-se com a leitura dos arquivos de configuração, de dados e cabeçalho. Isto é realizado através da opção

“*Oscilografia*”, encontrada na barra de ferramentas principal. Nesta etapa, é executada uma rotina adicional, desenvolvida para a conversão dos dados.

### 7.1.3 - Seleção dos Fasores e Identificação da Falta

Anterior à execução do algoritmo de localização, é necessária a seleção dos fasores fundamentais de 60 Hz de corrente e tensão, referentes aos instantes pré-falta, de início e pós-falta e à identificação do tipo de falta. Isto é realizado pelo operador, conjuntamente ao ajuste de cursores que podem ser inseridos e/ou excluídos dos gráficos, através de opções presentes na barra de ferramentas, ponto D3.

Após a estimação fasorial, as informações dos canais analógicos de corrente e tensão e os dados dos canais digitais são exibidos na interface principal do aplicativo, inclusive com indicação visual, através de gráficos, como indicado pelos pontos D4 e D5. Cada canal analógico possui sua própria escala, e os valores máximos são indicados no painel à esquerda, em D6, e os instantâneos, no painel à direita, em D7. São fornecidas ao usuário diversas informações sobre o evento, a linha, além da data e hora de início e término do registro, como indicado em D2.

### 7.1.4 – Verificação dos parâmetros

Alguns parâmetros da linha de transmissão podem ser acessados através do botão “*Parâmetros*”, que acessa o formulário contendo os dados, como no exemplo da FIG. 7.4.

Parâmetro	Valor	Unidade
RLO	0.49495	ohms/km
RL1	0.031799	ohms/km
LLO	3.329878	mH/km
LL1	0.973767	mH/km
CLO	8.684	nF/km
CL1	12.1259	nF/km
LTOT	400	km
FREQ	60	Hz

FIGURA 7.4 – Formulário com os parâmetros da linha

## 7.2 – Interface de Localização

O acesso à tela de localização da falta pode ser feito através do botão “Localizar”, na barra de ferramentas principal, como mostra a FIG. 7.5. Em L1, são mostradas algumas informações do arquivo de configuração como nomes dos arquivos dos terminais emissor e receptor e as datas e horários de registros dos arquivos de falta. No ponto L2, têm-se informações a respeito dos valores máximos dos fasores de tensão e corrente, durante a falta.

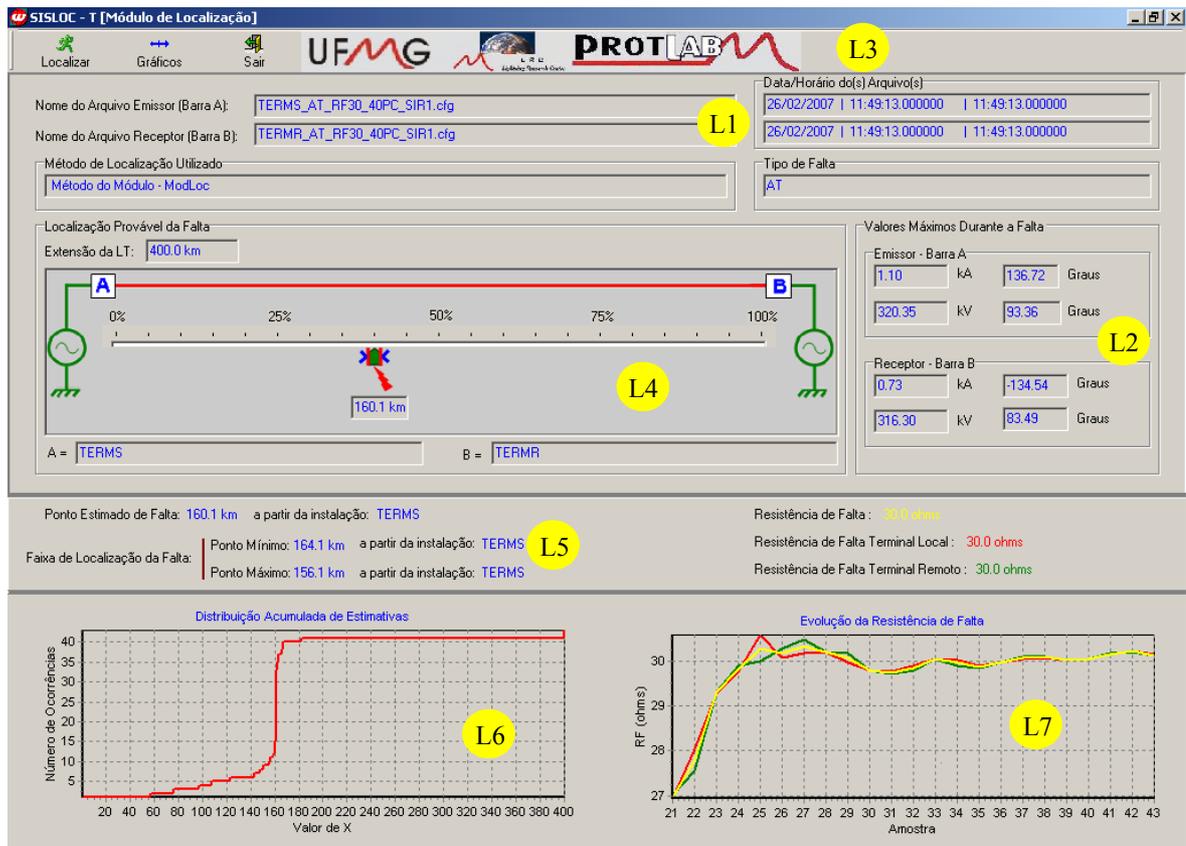


FIGURA 7.5 – Formulário do módulo de localização

### 7.2.1 - A Localização da Falta

Através do botão “Localizar”, na barra de ferramentas, em L3, finalmente é feita a localização da falta. Há indicações do local da falta, conforme mostrado em L4 e em L5, que trazem a faixa de distância em que, provavelmente, vai estar o ponto de defeito. Em L6, tem-se uma indicação visual do ponto de defeito e, em L7, a estimativa da resistência de falta, durante o curto-circuito. O botão “Gráfico”, na barra de ferramentas, ponto L1,

leva a uma curva com o valor das estimativas do local da falta, durante o curto-circuito, conforme mostrado na FIG. 7.6.

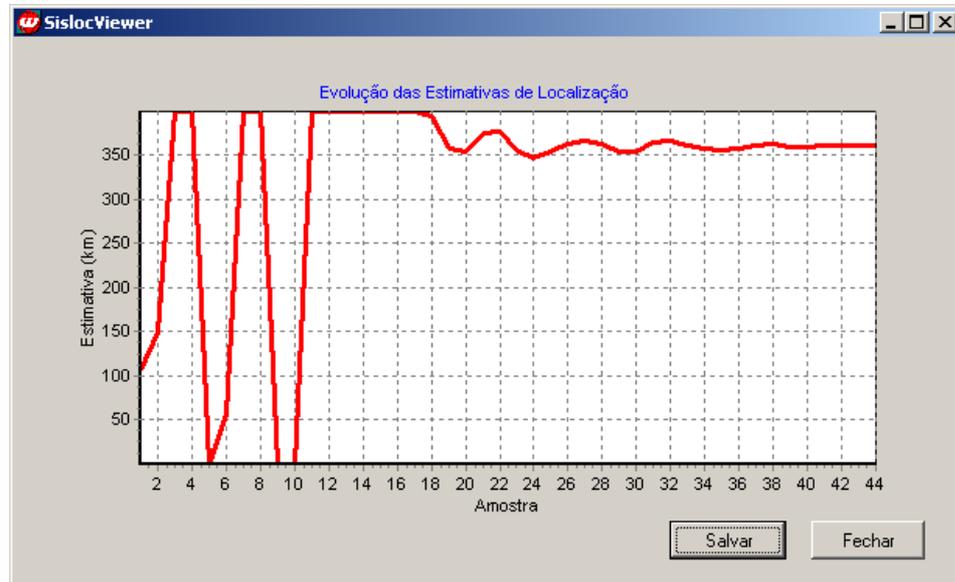


FIGURA 7.6 – Estimativa do local de falta

### 7.3 – Guia de Utilização

Na presente seção, mostra-se, passo a passo, como executar a localização em um caso exemplo.

Com o programa aberto, inicialmente, faça a escolha do algoritmo, conforme item 7.1.1, clicando em “*Configurações*”. Em seguida, clique em “*Oscilografia*”, e a janela da FIG. 7.7 será exibida na tela.

Procure o diretório onde se encontram os arquivos de registro do evento (oscilografias) e selecione o arquivo apropriado. Neste diretório, deverão estar os arquivos .CFG, .DAT e o .HDR, com o mesmo nome<sup>1</sup>. Feita a escolha, serão exibidas as telas da FIG. 7.8 e 7.9.

<sup>1</sup> Por exemplo, Caso1.CFG, Caso1.DAT, Caso1.HDR

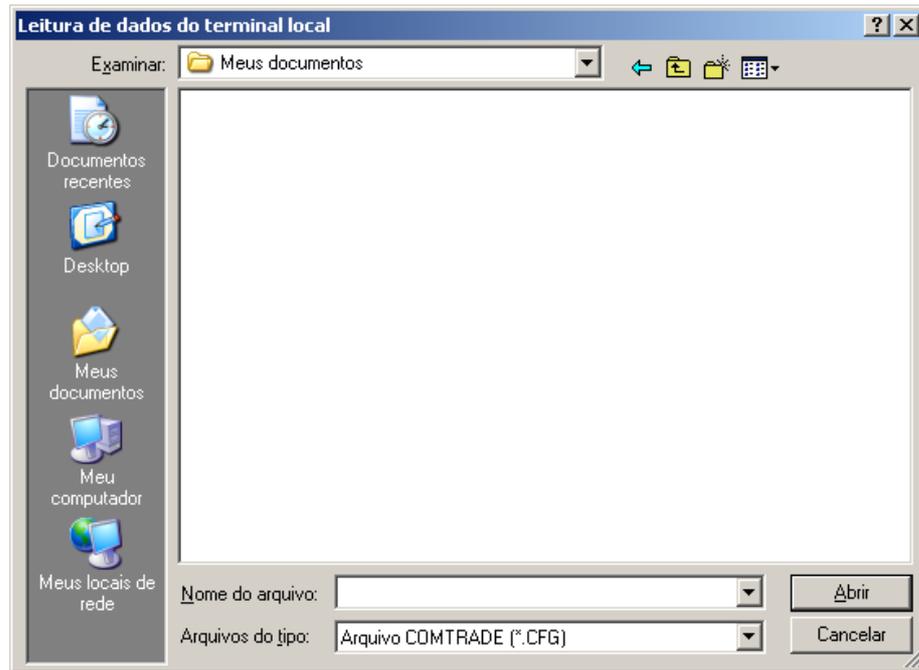


FIGURA 7.7 – Leitura de dados

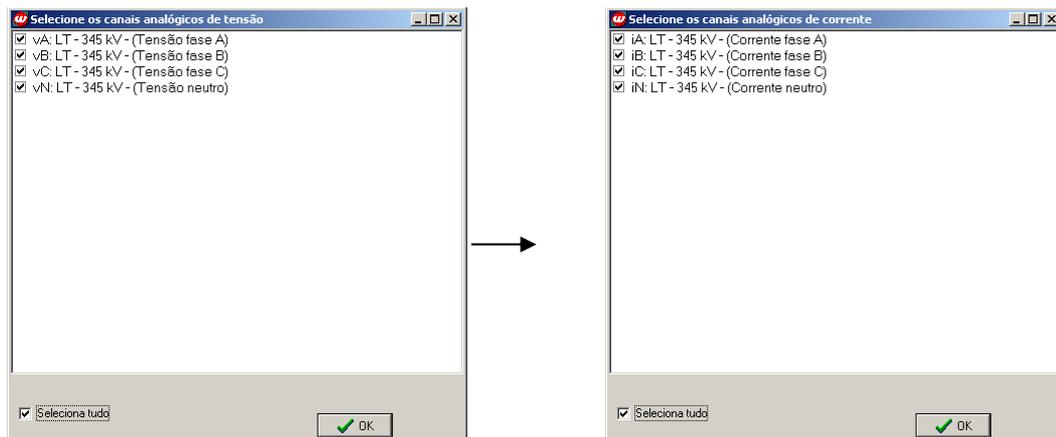


FIGURA 7.8 – Seleção dos canais analógicos

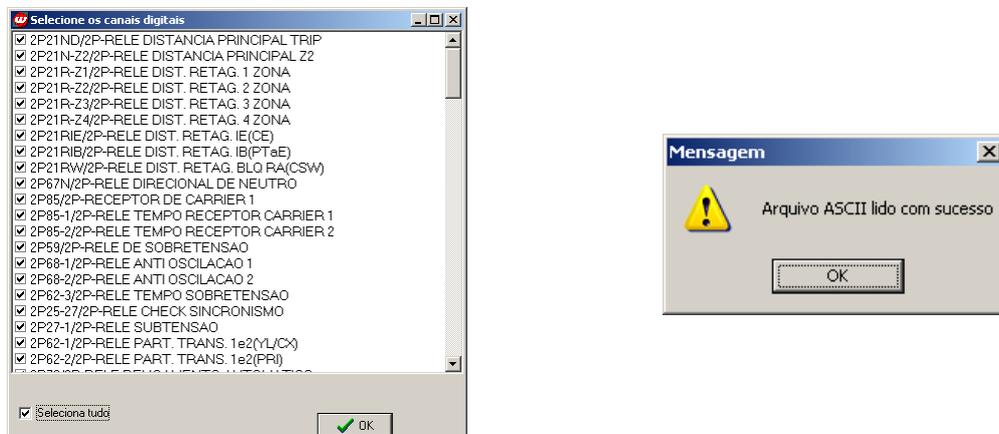


FIGURA 7.9 – Seleção dos canais digitais

Nessas telas, é possível efetuar a seleção dos canais que se deseja abrir. A escolha dos canais digitais é opcional. Os gráficos e informações pertinentes ao evento serão exibidos na tela, conforme a FIG. 7.1. Para algoritmo de dois terminais, deve ser repetido o processo, de forma a carregar os arquivos do terminal remoto. As telas de dados dos terminais local e remoto podem ser acessadas, uma de cada vez, através do botão “*Alterna*”. A barra de ferramentas, situada logo acima das oscilografias, apresenta os seguintes botões e funcionalidades:



Inserir novo marcador



Apaga o último marcador adicionado



Ativa / Desativa a exibição das ondas oscilografadas



Ativa / Desativa a exibição dos fasores reconstruídos no tempo



Ativa / Desativa a exibição do módulo do fasor estimado



Habilita / Desabilita a função Zoom<sup>2</sup>



Converte os valores das tensões e correntes para os valores reais da barra (primário dos transformadores de corrente e potencial)



Converte os valores das tensões e correntes para os valores oscilografados (secundário dos transformadores de corrente e potencial)



Ativa / Desativa a exibição de todas as oscilografias na mesma escala



Marcador Ativo



Marcador Inativo

<sup>2</sup> Zoom In: Clicar e manter pressionado o botão esquerdo do mouse e arrastar o mesmo na diagonal, de cima para baixo, da esquerda para a direita.

Zoom Out: Fazer o mesmo que para Zoom In, porém arrastando o mouse na diagonal oposta.

Para a correta execução do método de localização, é necessário inserir três marcadores. O de número zero deve ser posicionado em um local da oscilografia onde existam apenas dados pré-falta, o número 1, no início, e o número 2, no final da falta. Visualmente, determine o tipo de falta ocorrido e o selecione na lista. A FIG. 7.10 demonstra este procedimento. Caso necessário, coloque todas as oscilografias na mesma escala, para facilitar a determinação do tipo de falta ocorrido.

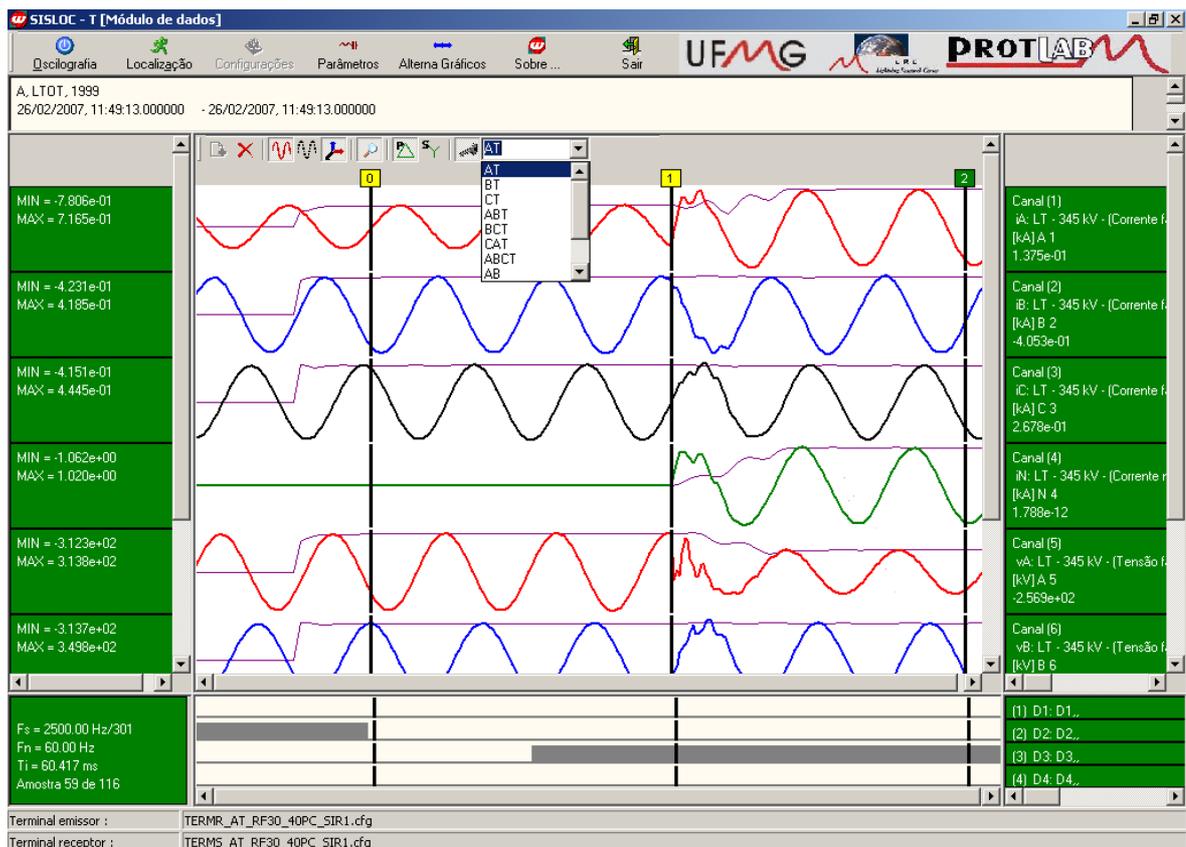


FIGURA 7.10 – Inserção dos marcadores e seleção do tipo de falta

Clique em “Localização” para iniciar o módulo do programa efetivamente responsável pela localização. Clique em “Localizar”, na barra de tarefas da FIG. 7.5, e serão exibidos os resultados relativos à localização de falta.

## 7.4 – Configurações mínimas

Embora seja tecnicamente possível a utilização deste *software* em qualquer plataforma PC que utilize um sistema operacional mais recente que o Windows 95 / NT 4,

dada a sua natureza de manipulação de grandes matrizes e, por conseqüência, de um grande volume de dados, indica-se a seguinte configuração mínima:

Processador: K6-2 / Pentium II 400 Mhz  
Memória RAM: 64 MB  
Espaço em Disco<sup>3</sup>: 50 MB  
Resolução de Vídeo: 1024x768 256 cores  
Sistema Operacional: Windows 95 / NT 4

Configuração recomendada:

Processador: Athlon / Pentium 4 1.5 GHz  
Memória RAM: 256 MB  
Espaço em Disco<sup>3</sup>: 50 MB  
Resolução de Vídeo: 1024x768 32bits  
Sistema Operacional: Windows XP

---

<sup>3</sup> Espaço necessário apenas para a instalação do *software*.

# 8

## CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho teve como principais objetivos a busca de novos algoritmos para a localização de faltas e o aprimoramento em algoritmos existentes, utilizando grandezas fasoriais e o desenvolvimento de um *software* para aplicação em situações práticas. De posse dos dados disponíveis para a localização, como o número de terminais, extensão da linha, transposição, presença de linhas paralelas, é possível classificar os métodos mais adequados, visando à sua aplicação prática, com a conseqüente minimização dos erros em casos reais de curto-circuito.

Para atingir esses objetivos, além de uma infra-estrutura adequada para o desenvolvimento da pesquisa, é importante o apoio de uma concessionária de energia elétrica, que opere com um sistema real e disponha de um banco de dados. A CEMIG<sup>(1)</sup>, em seu convênio com o LRC/UFMG, tem-se mostrado a parceira ideal para este trabalho, fornecendo ao PROTLab/LRC/UFMG um número significativo de casos de curto-circuito em suas linhas de transmissão, ocorridos em um extenso período de tempo.

O problema de localização de faltas em linhas de transmissão está intrinsecamente relacionado à tecnologia vigente na época. Os primeiros localizadores utilizavam dados de apenas um terminal, basicamente em função da dificuldade de sincronização de dados de ambos os terminais e da inexistência de canais adequados de comunicação. Com o advento do GPS, da tecnologia digital e de comunicação de dados, a partir do início da década de 90, o uso de dois terminais passou a ser mais difundido, com uma possibilidade real de sincronização de dados a um custo reduzido. Os sistemas de localização de faltas, com sincronização por meio de GPS, ainda não são uma realidade generalizada nas concessionárias de energia elétrica.

O localizador de faltas baseado nas ondas viajantes pode, a princípio, ser mais robusto aos fatores que normalmente reduzem a precisão, como erros de transformadores de corrente e potencial, presença de linhas paralelas, compensação série, incertezas de parâmetros. Uma parceria do PROTLab/LRC/UFMG, em um projeto de pesquisa com a

<sup>(1)</sup> CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CEMIG, proporcionou o desenvolvimento de um equipamento protótipo de localização por ondas viajantes. Na oportunidade, foi possível estudar o método, desenvolver filtros digitais e técnicas de detecção de surtos e participar do projeto do *hardware*. O maior problema a ser resolvido nesses equipamentos, que necessitam de uma elevada taxa de amostragem, são os ruídos presentes nos dados, que dificultam a detecção dos surtos e diminuem a precisão em alguns casos.

A revisão bibliográfica possibilitou verificar o estado da arte e fornecer subsídios para o desenvolvimento do trabalho. O algoritmo de Johns & Jamali, base de outros da classe de dois terminais, considera a linha com parâmetros distribuídos e utiliza valores de seqüência para encontrar a solução, considerando a linha perfeitamente transposta. Os autores, entretanto, não apresentam um estudo conclusivo da aplicação do algoritmo em linhas não balanceadas, embora afirmem que os erros são reduzidos.

Na classe dos que utilizam dados de um terminal, alguns algoritmos são mais difundidos, como os de Takagi e Wiszniewski, embora todos apresentem simplificações ou aproximações no desenvolvimento matemático, em função da ausência de dados remotos e do valor da resistência de falta. Normalmente, consideram que as correntes de contribuição para a falta dos dois terminais têm a mesma fase ou utilizam as impedâncias das fontes, cujo real valor é desconhecido no momento do curto-circuito.

Os resultados iniciais dos métodos de localização de dois terminais propostos no trabalho (OtimLoc e LocMod) foram comparados aos obtidos pelo método de Johns. Para todos os algoritmos, executaram-se as rotinas de pré-processamento com as mesmas características.

No estudo da variação dos parâmetros da linha, no capítulo 5, foi constatado que as impedâncias próprias e mútuas e de seqüência zero no domínio modal variam com a resistividade. Já as capacitâncias sofrem alterações com a variação da altura dos condutores em relação ao solo. Observou-se que o algoritmo de Johns, utilizando seqüência positiva, não sofre os efeitos das variações da resistividade do solo, e os erros obtidos mantêm-se praticamente constantes, o mesmo não ocorrendo para a formulação do método no domínio de fases.

No estudo do efeito da transposição, no algoritmo de Johns, inicialmente, determinou-se o perfil da amplitude e a fase dos fasores de tensão de seqüência positiva, ao longo de uma linha de 90 km e de outra de 400 km, ambas não transpostas, que se diferem,

entre outras características, pelo plano de simetria dos condutores. Pelos resultados obtidos, observa-se que, para a linha de 90 km, o fator transposição não é importante sob o aspecto de localização de faltas. Para a linha de 400 km, o algoritmo está propenso a apresentar maiores erros, embora não seja uma situação prática a não-transposição nessa extensão, tendo sido utilizada com o objetivo de evidenciar o efeito.

Em relação ao método de dois terminais, fez-se o estudo da aplicação do método de Johns nos domínios modal, conforme proposto originalmente no artigo, e de fases, para as linhas de 138 kV e 345 kV com 200 km e 400 km de extensão, respectivamente. A influência do solo também foi analisada. Para a linha de 200 km, não se verificaram ganhos em se considerar a não-transposição da linha, ou seja, no domínio modal, a suposição da linha perfeitamente transposta pode ser feita. Para o algoritmo de Johns, aplicado à linha de 400 km, que possui trechos de transposição ao longo da extensão, a aplicação do domínio modal provocou um aumento nos erros, principalmente para faltas próximas ao meio da linha e dos tipos fase-terra e fase-fase. De forma a verificar o comportamento dos erros na linha com transposições, usou-se o domínio de fases, com as matrizes de parâmetros para a linha perfeitamente transposta e uma solução por trecho (as matrizes  $[Z]$  e  $[Y]$  variam conforme o trecho da transposição em análise). As duas formas de solução no domínio de fases apresentaram erros semelhantes e são sensíveis às variações da resistividade do solo e altura dos cabos. Com estes testes de simulação feitos inicialmente, não ficou definida a melhor forma de resolver o problema: utilizar o domínio modal ou de fases. Posteriormente, aplicando os dois domínios em alguns casos reais de curto-circuito, observou-se que a solução por modos tem erro médio menor, sendo mais robusta e indicada para a localização de faltas.

O algoritmo de Takagi foi aplicado à linha de 200 km não transposta, tendo sido verificado um grande aumento nos erros, ao se comparar com os obtidos para a linha perfeitamente transposta, para faltas tipo fase-terra e fase-fase. Ao se provocarem as variações na resistividade do solo, houve um acréscimo nos erros, o que já era previsto, pois o algoritmo faz uso da seqüência zero, no seu equacionamento. Para a linha de 400 km com transposições, também foi verificada a grande influência da seqüência zero, nos resultados alcançados. Na aplicação do método a alguns casos reais, fez-se a localização para a mesma falta a partir dos dois terminais, sendo que, em um deles, houve um erro aceitável. Esta é uma das questões práticas que inibem o uso de um terminal, pois, tendo-se

apenas um deles disponível para coletar os dados, pode ser que seja do que irá possibilitar o maior erro.

Fez-se um estudo de alguns fatores que provocam erros em localização de faltas. Em relação aos transformadores de corrente e potencial, fica evidente que algumas combinações de variações na fase e amplitude dos fasores deterioram a resposta dos localizadores. A sincronização dos dados no tempo é um fator importante para a maioria dos algoritmos que utilizam dados de dois terminais. É importante registrar que mesmo alguns equipamentos que dispõem deste recurso não possuem resolução adequada no tempo, o que faz aumentar os erros de localização. A detecção do instante de falta torna-se um fator importante para algoritmos de dois terminais com dados não sincronizados, tendo sido verificado que, dependendo da escolha do ponto de início da falta, que às vezes não é clara, os resultados sofrem variações consideráveis, sendo necessário executar esta rotina com atenção, de forma a evitar maiores erros. Foi feito um estudo mostrando o efeito combinado da resistência de falta com o fluxo de carga e as impedâncias do sistema, quando se utilizam dados de um terminal. Ficou clara a influência destes fatores, o que justifica a existência de um grande número de algoritmos que tentam reduzir os seus efeitos e erros de localização.

Na determinação das impedâncias das fontes, as equações mostradas, derivadas do circuito superposto, baseiam-se no fato de não haver impedâncias em paralelo com a linha. O método foi aplicado em simulações e em alguns casos reais de curto-circuito, embora não houvesse informações acerca da topologia do sistema em que estão inseridas as linhas. Analisando os resultados dos casos simulados, observa-se que as estimativas possuem boa precisão, sendo possível a determinação dos valores das impedâncias das fontes, no momento de curto-circuito. Para as faltas reais, é necessário ter mais informações do sistema elétrico, para se ter uma avaliação mais conclusiva.

Para a verificação da influência das impedâncias das fontes na localização de faltas, implementou-se o método de Wiszniewski. Observou-se que, para baixos valores de resistência de falta, não há grandes diferenças, se as impedâncias não são fornecidas. Mas, quando se tornam elevados e existe grande diferença entre a capacidade de curto-circuito das fontes, os valores das impedâncias das fontes tornam-se importantes nos resultados. Aplicou-se o algoritmo de Wiszniewski aos casos reais, mas não houve diferenças

significativas no local estimado. Isto ocorreu devido ao fato de as resistências de falta apresentarem baixos valores, tornando pequeno o efeito da correção feita pelo algoritmo.

A localização com dados de dois terminais, utilizando técnicas de otimização (OtimLoc) para o modelo de linha curta, foi aplicada a dados simulados, apresentando erros inferiores a 1,2% em uma linha de 200 km e estimando, além da distância, a resistência de falta. O método de otimização utilizado foi o algoritmo elipsoidal, que se mostrou rápido e estável. Foi desenvolvido também um modelo de linha longa, que, embora tenha reduzido os erros nos casos simulados, quando aplicado aos casos reais, teve desempenho semelhante ao algoritmo para linhas curtas.

Um novo método de localização foi desenvolvido, denominado LocMod, tendo como aspectos importantes o fato de não necessitar que as amostras estejam sincronizadas e utilizar o domínio modal. É importante que se defina o início da falta para o algoritmo, em cada conjunto de dados. O modelo impedância série da linha determina o local da falta pela solução de uma equação do segundo grau, requerendo baixo esforço computacional. No modelo de linha longa, é necessário determinar o ponto de mínimo da função objetivo. Nas simulações, o modelo de linha curta obteve resultados menos precisos que o método de Johns, o que já era esperado por não conter as correções hiperbólicas. O modelo de linha longa apresentou erros semelhantes ao método de Johns, inferiores a 0,5%, com resistência de falta 100 ohms. Ao se provocar mudanças na fase dos fasores remotos, verificaram-se os mesmos resultados para os dados sincronizados, enquanto, no algoritmo de Johns, houve um aumento significativo dos erros.

O LocMod, nos modelos de linha curta e longa, foi submetido aos casos reais de curto-circuito, juntamente com um outro algoritmo, de Jan & Rafal, que não necessita de dados sincronizados. Com os dados sincronizados, o erro médio foi próximo ao obtido pelo algoritmo de Johns. Ao se aplicarem os dados não sincronizados, como os gravados pelos registradores, observou-se, no LocMod e no algoritmo de Jan & Rafal, os mesmos resultados para os dados sincronizados, enquanto que, no algoritmo de Johns, houve um aumento significativo nos erros. Os erros médios dos modelos de linha curta e longa do LocMod tiveram erros médios semelhantes, o que evidencia que as correções hiperbólicas produzirão maior efeito, efetivamente, para linhas longas, como nos casos 3 e 4 da TAB. 6.9. Foi utilizada uma formulação para o LocMod, modelo de linha longa, no domínio de fases, e o desempenho foi semelhante ao alcançado pelo algoritmo de Johns,

domínio de fases, na TAB. 5.6, mostrando ser o domínio modal mais indicado para localizar faltas.

Em uma linha paralela de 200 km, foram aplicadas faltas ao longo de sua extensão, de forma a proceder às localizações, aplicando um método baseado no domínio modal. Para a linha perfeitamente transposta, os erros foram reduzidos, conforme esperado. Porém, para a linha não transposta e resolvendo-se a localização, supondo-a perfeitamente transposta, os erros aumentaram bastante. Para reduzir os erros, utilizou-se a técnica de encontrar as matrizes  $[T_V]$  e  $[T_I]$  que diagonalizam os produtos  $[Z][Y]$  e  $[Y][Z]$ . Ao se aplicarem as matrizes adequadas que separam a linha dupla trifásica em seus modos exatos e selecionando um modo aéreo da linha em falta para efetuar a localização, os erros, devido à não-transposição, reduziram-se bastante, havendo um ganho importante na precisão.

Foi desenvolvido, nesta tese de doutorado, um sistema específico de localização de faltas, o SISLOC-T, com alguns dos algoritmos abordados no texto. A linguagem de programação utilizada foi o C++, e o aplicativo possui interfaces amigáveis, que facilitam a tarefa de localização de faltas. Os dados de entrada podem estar no formato ASCII de programas de simulação de transitórios ou no padrão COMTRADE e, a partir de algumas intervenções do operador, o programa está apto a fornecer o local da falta.

Existem, na literatura, inúmeras propostas de algoritmos de localização de faltas, bastante elaborados, sendo que muitos não levam em consideração alguns aspectos relevantes na tarefa de localização de faltas, para a aplicação prática em empresas concessionárias de energia. É importante destacar que indicações incorretas levam ao descrédito do algoritmo, podendo este ser abandonado pelo pessoal de manutenção.

## 8.1 – Propostas de Continuidade do Trabalho

- O programa de localização de faltas desenvolvido pode, eventualmente, agregar outros recursos, como novos algoritmos de localização, gráficos, tratamento de oscilografia, que vão depender do local de utilização e das adaptações que se queira fazer. De forma complementar, poderá ser utilizado um sistema de localização de tempestades e programas de curto-circuito, de forma a auxiliar na busca ao ponto de defeito.

- Um estudo estatístico da resposta dos algoritmos e de alguns fatores, como o número de terminais utilizados para a localização e o número de ciclos da onda de falta disponíveis, pode fornecer à equipe de manutenção uma faixa mais confiável que possa conter o local de defeito.
- O algoritmo de Takagi, em linhas de circuito duplo e não transpostas, típicas para o nível de tensão de 138 kV, pode ser aperfeiçoado de forma a reduzir o erro de localização nestas condições.
- Os algoritmos estudados devem ser aplicados a mais casos reais de curto-circuito, de forma a se ter na prática, a ordem de grandeza dos erros dos algoritmos de localização.
- Elaborar estudos referentes à precisão de localizadores de um terminal, com a utilização de impedâncias equivalentes obtidas a partir de programas de curto-circuito na concessionária.
- Estudar a aplicação do LocMod, modelo de linha curta, na proteção de distância da linha de transmissão, com comunicação entre os terminais.

## ANEXO – DADOS DAS LINHAS E FONTES

### A.1 – Geometria das Linhas

#### A.1.1 – Linha de 138 kV

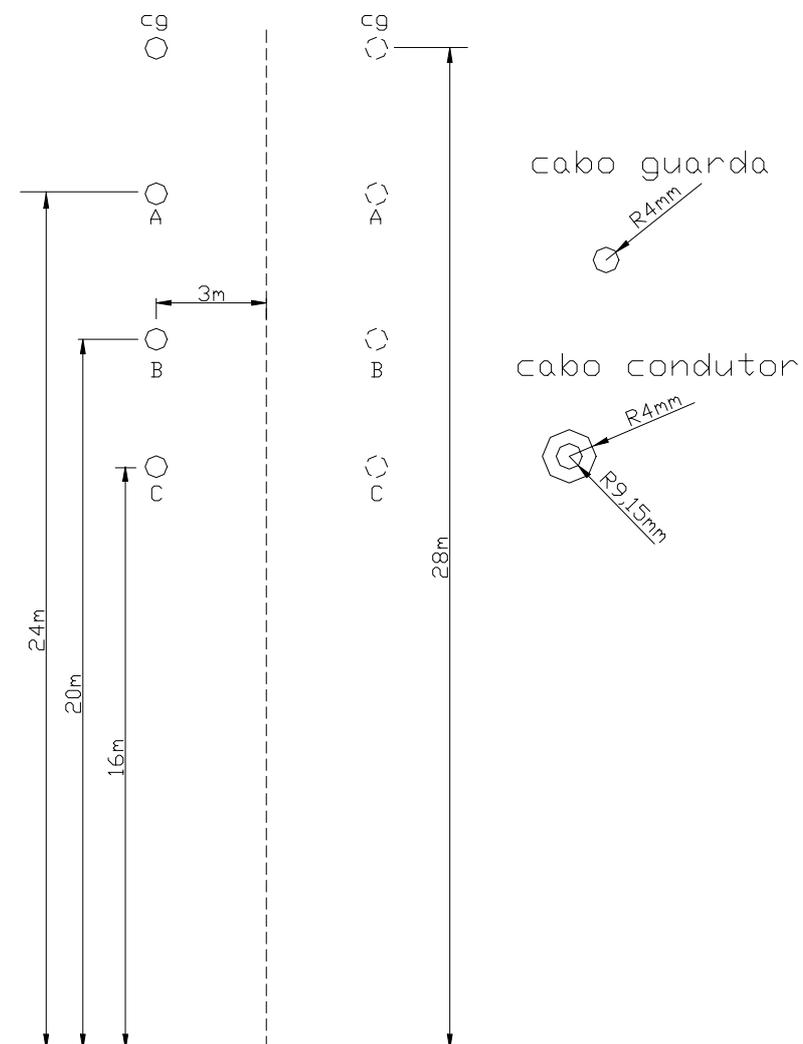


FIGURA A.1 – Geometria da linha de 138 kV

### A.1.2 - Linha de 345 kV

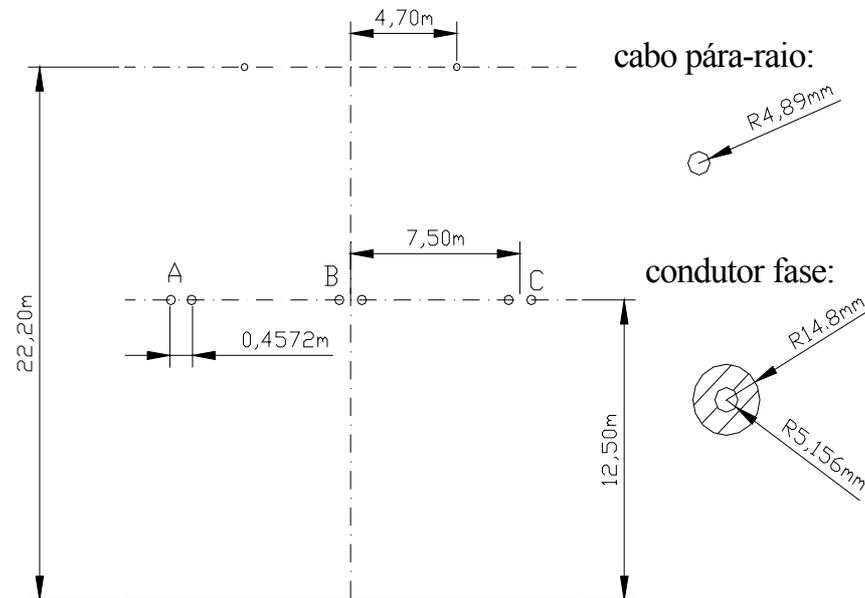


FIGURA A.2 – Geometria da linha de 345 kV

### A.2 – Parâmetros das Linhas

Na TAB. A.1, apresentam-se os parâmetros das linhas, considerando

- Linha transposta
- Resistividade do solo de 1000  $\Omega\text{m}$
- Frequência de 60 Hz

TABELA A.1 – Parâmetros das linhas utilizadas nas faltas simuladas

Linha	Seqüência Positiva			Seqüência Zero		
	$r_1$ (ohm/km)	$x_1$ (ohm/km)	$c_1$ (nF/km)	$r_0$ (ohm/km)	$x_0$ (ohm/km)	$c_0$ (nF/km)
138 kV	0,175	0,6997	8,45	0,462400	1,8	5,44
345 kV	0,031432	0,3649	12,05	0,423463	1,2515	7,786

### A.3 – Dados das Fontes

Na TAB. A.2, mostram-se impedâncias das fontes, sendo a frequência utilizada de 60 Hz

TABELA A.2 – Dados das fontes utilizadas nas faltas simuladas

Linha	Terminal	Seqüência Positiva (ohms)	Seqüência Zero (ohms)
138 kV	Local	0,635+j 132,7	0,444+j 93,11
	Remoto	0,635+j 132,7	0,444+j 93,11
345 kV	Local	6,5+j 400	6,5+j 400
	Remoto	6,5+j 400	6,5+j 400

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] BLACKBURN, J. L., Protective Relaying: Principles and Applications. New York: Marcel Dekker, 1987.
- [2] Pereira I. H., Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão com Informações dos dois Terminais. 2004. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte.
- [3] GIRGIS, A. A., Hart, D. G., Peterson, W. L., A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, 1992, p. 98-107.
- [4] GOPALAKRISHNAN A., Kezunovic, M., Fault Location Using the Distributed Parameter Transmission Line Model. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, 2000, p. 1169-1174.
- [5] JIANG, J., Yang, J., Lin, Y., Liu, An Adaptative PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines Part I: Theory and Algorithms, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, 2000, p. 486-2000.
- [6] NOVOSEL, D., Hart, D. G., Udren, E., Garitty, J., Unsynchronized Two-Terminal Fault Location Estimation. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, 1996, p. 130-138.
- [7] SILVEIRA, E. G., Localização Digital de Faltas em Linhas de Transmissão com Utilização dos Dados de um Terminal. 2001. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte.
- [8] PSCAD/EMTDC Simulation Program – V4.0 Personal Edition. MANITOBA HVDC Research Center. Winnipeg, Canada, 2003.
- [9] Alternative Transient Program Rule Book, European EMTP Center, Leuven, Bélgica 1987.
- [10] ARAÚJO, A. E. A., Neves, W. L. A., Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. Belo Horizonte: Editora Campus, 2005.

- [11] CARSON, J. R., Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System Technical Journal 5, 1926, p. 539 – 554
- [12] DERI, A., Tevan G., Semlyen A., The Complex Ground Return Plane A Simple Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 100, 1981, p. 3686-3693.
- [13] GLOVER, J. D., Sarma M., Power System Analysis and Design, Boston: PWS, 1993.
- [14] PEREIRA, C. Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, 1998, p. 01-202. (Notas de Aula)
- [15] WEDEPOHL, L. M., Application of Matrix Methods to the Solution of Traveling-Wave Phenomena in Polyphase Systems. IEE Proceedings, vol. 110, 1963, p. 2200-2212.
- [16] PEREIRA, C. E. M., Localização Digital de Falhas em Linhas de Transmissão: Desenvolvimento e Aperfeiçoamento de Algoritmos. 2003, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- [17] WEDEPOHL, L. M., Nguyen H. V., Irwin, G. D., Frequency-Dependent Transformation Matrices for Untransposed Transmission Lines Using Newton-Raphson Method. IEEE Trans. On Power System, vol. 11, 1997, p. 1538-1546.
- [18] DOMMEL, H. W., Eletromagnetic Transient Program – Reference Manual (EMTP Theory Book. Portland, Ore: Bonneville Power Administration, 1986.
- [19] HEDMAN, D. E., Propagation on Overhead Transmission Lines. I – Theory of Modal Analysis, IEEE, 1965.
- [20] KUROKAWA, S., Parâmetros Longitudinais e Transversais de Linhas de Transmissão Calculados a Partir das Correntes e Tensões de Fase. 2003, Tese de Doutorado, Campinas.
- [21] NAIDU, S. R., Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, Campina Grande: 1985.

- [22] ABREU, S.S., Pereira, C., Bolda, R. C., Melo, J. C. D. A Influência de Ruídos Espúrios na Precisão e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando o Método das Ondas Viajantes, In: XVIII SNPTEE, 2005, Curitiba. Anais... 2005. v.Único
- [23] GALE, P. F., Crossley, P. A., Fault Location Basead on Travelling Waves, IEE Conference on Developments in Power Systems Protection, York, 30<sup>th</sup> March-1st April 1993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel3/1186/5871/00224565.pdf>>. Acesso em: 10 maio de 2005.
- [24] PEREIRA, C., Abreu, S. S., Silveira, E.G., Bolda, R.C., Melo, J. C.D., Andrade, A. D., Barbosa, A. D., e Markewicz, R. L., A PC Prototype Fault Locator Traveling Wave Method Using Digital Filters and Wavelet Transform, In: GROUND`2004 – Conference on Grounding and Earthing & 1<sup>ST</sup> LPE – International Lightning Physics and Effects, 2004, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 2004.
- [25] JOHNS, A. T., Jamali, S., Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Line. IEE Proceedings, vol. 137, 1990, p. 395-402.
- [26] LAWRENCE, J. L., Cabeza, L. Z., Hochberg, L. T., Development of an Advanced Transmission Line Fault Location System Part I: Input Transducer Analysis and Requirements. IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 7, 1992, p. 1963-1971.
- [27] LAWRENCE, J. L., Cabeza, L. Z., Hochberg, L. T., Development of an Advanced Transmission Line Fault Location System Part II: Algorithm Development and Simulation. IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 7, 1992, p. 1972-1983.
- [28] ZHENG, C., Luo, C., Su, J., Wu, J., A Fault Location Algorithm for Transmission Line Based on Distributed Parameter. IEE Conference Publication, 479, 2002, p. 411-413.
- [29] CHEN, C., Liu, C., Jiang, J., A New Adaptative PMU Based Protection Scheme for Transposed/Untransposed Parallel Transmission Lines. IEEE Trans. Power Delivery, vol 17, 2002, p. 395-404.
- [30] IZYKOWSKI, J., Molag, R., Rosolowski, E., Saha, M. M., Accurate Location of Faults on Power Transmission Lines With Use of Two-End Unsynchronized Measurements. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 21, 2006, p. 627-633.

- [31] SANT, M. T., Paithankar, M. E., Online Digital Fault Locator for Overhead Transmission Line. Proceedings IEE, 1979, p. 1181-1185.
- [32] ZHENG, C., XinZhou, D., Chengmu, L., Robustness of One-Terminal Fault Location Algorithm based on Power Frequency Quantities. IEEE Trans., 2002, p. 1118-1122.
- [33] TAKAGI, T., Yamakoshi, Y., Baba, J., Uemura, K., Sakagushi, A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines Part I Fourier Transform Method. IEEE Trans., PAS-100, 1981, p. 1316-1322.
- [34] TAKAGI, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., Matsushima, T. Developments of A New Type of Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. IEEE Trans., PAS-101, 1982, p. 2892 - 2898.
- [35] WISZNIEWSKI, A., Accurate Fault Impedance Locating Algorithm. Proceedings IEE, 1983, p. 311-315.
- [36] ERIKSON, L., Saha, M. M., Rockefeller, G. D., An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote and Infeed, IEEE Trans. PAS-104, 1985, p. 424-435.
- [37] JOHNS, A. T., Moore, P. J., Whittard, R., New Technique for the Accurate Location of Earth Faults on Transmission Systems. IEE Proceedings, vol. 142, 1995, p. 119-127.
- [38] YIBIN, X., Wai, D. C. T., Keerthipala, W. W., A New Technique Using Wavelets Analysis for Fault Location. IEE Conference Publication, n° 434, 1997, p. 231-234.
- [39] DJURIĆ, M. B., Radojević, Z. M., Distance Protection and Fault Location Utilizing Only Phase Current Phasors. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, 1998, p. 1020-1026.
- [40] ADU, T., A New Transmission Line Fault Locating System, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, 2001, p. 498-503.
- [41] POPOVIĆ, L. J. M., Radojević, Z. M., Digital Fault-Location Algorithm Including Grounding Impedance at Fault Place. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 148, 2001, p. 291-295.

- [42] XINZHOU, D., Zheng, C., Xuanzhou, H., Kehong, W., Chengmu, L., Optimizing Solution of Fault Location. IEEE, 2002, p.1113-1117.
- [43] IEEE Commom Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems Relay Committee of the IEEE Power Engineering Society, New York, USA, IEEE Standard C37.111-1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/standards.jsp>>. Acesso em: 27 junho 2005.
- [44] PHADKE, A. G., Thorp, J. S., Computer Relaying for Power Systems. New York: John Wiley&Sons Inc, 1988, 289 p.
- [45] PEREIRA, C., Cruz, F. C., Análise do Comportamento Estático e Dinâmico dos Filtros Digitais de Mínimos Quadrados na Proteção de Linhas de Transmissão. In: XV SNPTEE, 1999, Foz do Iguaçu. Anais... 1999
- [46] SACHDEV M. S., Baribeau, M. A., A New Algorithm for Digital Impedance Relays. IEEE Trans. PAS-98, 1979, p. 2232-2240.
- [47] PEREIRA, C., Curso de Proteção Digital de Linhas de Transmissão. Belo Horizonte, 1998, p. 01-143. Convênio ELETROBRAS/FCO/EE.UFMG.
- [48] NORTON, J. P., Introduction to Identification. London: Academic Press, 1986.
- [49] IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission an Distribution Lines, Power Systems Relaying Committee, New York, USA, IEEE Standard C37.114-2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/standards.jsp>>. Acesso em 27 junho 2005.
- [50] SILVEIRA, E. G., Pereira, C., Utilização de Oscilografia de Dados de Curto-Circuito para Determinação das Impedâncias Equivalentes das Fontes da Linha de Transmissão e sua Influência na Localização destas Faltas. In: XVIII SNPTEE, 2005, Curitiba. Anais... 2005.
- [51] TAKAHASHI, R., H., C., Otimização Escalar e Vetorial. Belo Horizonte, 2004, p. 01-260. (Notas de Aula) Disponível em: <<http://www.mat.ufmg.br/~taka/Download/otev04.pdf>>. Acesso em: 01 fevereiro 2005.

[52] SOUZA, W., M., Costa, C., A., B., Pereira, H., I., Pereira, C., Sistema de Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando Dados de Dois Terminais. In: XVIII SNPTEE, 2005, Curitiba. Anais... 2005.

[53] SOUZA, T., M., Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão de Circuitos Duplos. 2007. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte.