Campus de São Carlos

"Localizador digital de faltas para linhas de transmissão
de múltiplos terminais"

Autor:

Elenilton Teodoro Domingues

Orientador:

Prof. Dr. Denis Vinícius Coury

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

70153/98

LOCALIZADOR DIGITAL DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO DE MÚLTIPLOS TERMINAIS

Elenilton Teodoro Domingues

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016670

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury

São Carlos

1998

Class.	TESE/EESC
Cutt.	5923
Tombo	T0153/98

0980559

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

D671L Domingues, Elenilton Teodoro
Localizador digital de faltas para linhas de
transmissão de múltiplos terminais / Elenilton
Teodoro Domingues. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury.

1. Localização de faltas. 2. Linhas de
múltiplos terminais. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ELENILTON TEODORO DOMINGUES**

Dissertação defendida e aprovada em 15-05-1998
pela Comissão Julgadora:

_____
Prof. Doutor **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

_____
Prof. Doutor **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

_____
Prof. Doutor **ALBERTO BIANCHI JÚNIOR**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

_____
Prof. Doutor **DENIS VINICIUS COURY**
Coordenador da Área de Engenharia Elétrica

_____
JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

---

*Aos meus pais, Felicio e Aurea
com muito amor e carinho.*

Ao nosso bom e generoso Deus, sem o qual nada seria possível de se realizar.

À minha família: minha mãe Aurea, meu pai Felício, meu irmão Edson, minha cunhada Graziela e meus sobrinhos Pedro Augusto e João Lucas pelo, carinho, amor, solidariedade, compreensão e incentivo nos momentos mais difíceis que encontrei.

Em especial ao Prof. Doutor Denis Vinicius Coury, que através de sua experiência, me ajudou e orientou sem medir esforços na elaboração deste trabalho.

Ao prof. Antônio Carlos Garcia de Almeida, pelos conselhos e amizade.

Aos amigos de republica: Arturo(Bretinhas) e Alexandre(Xandô), pelo companheirismo e por conseguirem arrancar sorrisos mesmo nas horas mais difíceis.

Aos amigos: Humberto(Galo da Campina), Gustavo(Buzza), Cristiano(Cris) e Rodrigo(Popó), por quem carrego muita confiança, admiração, carinho e amizade.

Aos companheiros(as): Angélica, Bruna, Chico, Ciomara, Curinga, Dado, Débora, Dori, Edson, Fernanda, Gê, João Manoel, Jorge, Juninho, Marcelo, Marcio Cardia, Marquinhos, Milão, Pica-pau, Priscila, Rinaldo, Rivaldo, Vigor, Vinícius e Zé João, pela amizade, e a tantos outros a quem peço desculpas pelas omissões.

Ao pessoal do mestrado: Alessandra, Arthur, Carlos, Clébea, Delbem, Donato, Ênio, Fumil, Hamiltom, Hélio, João Bosco, Luiz, Mário, Marcelinho, Marquinho, Paulo, Patricia, Renan, Ricardo, Rogerio, Sacchi e Silvio, pela amizade.

À Graça, por essa estranha e inexplicável felicidade que me faz sentir.

À Maria Cristina Tavares, pela inestimável cooperação nas dificuldades.

À Marcia, pelas correções de português.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da USP.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Superior, pela bolsa concedida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Localizadores de faltas para linhas de transmissão.....	2
1.2.1 A importância dos localizadores de faltas.....	4
1.2.2 <i>Hardware</i> para localizadores digitais de faltas.....	4
1.2.2.1 Transdutores de tensão e corrente.....	6
1.2.2.2 Módulo de <i>interface</i>	6
1.2.2.3 Módulo de sincronização	6
1.2.2.4 Conversor Analógico/Digital (A/D)	7
1.2.2.5 Dispositivos de memória.....	8
1.2.2.6 Microcomputador	8
1.3 Linhas de múltiplos terminais.....	8
1.4 Objetivo	9
1.5 Organização do trabalho.....	9

2. ESTADO DA ARTE - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO	11
2.1 Introdução.....	11
2.2 Técnicas de localização de faltas para linhas de dois terminais.....	12
2.2.1 Algoritmos que utilizam dados provenientes de somente um terminal da linha.	12
2.2.2 Algoritmos que utilizam dados provenientes de ambos os terminais da linha....	21
2.3 Técnicas de localização de faltas para linhas de três terminais	26
3. UM ALGORÍTMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS COM TRÊS TERMINAIS.....	28
3.1 Introdução.....	28
3.2 O algoritmo localizador de faltas	29
3.2.1 Detecção da falta.....	31
3.2.2 Sincronização dos dados provenientes dos três terminais	31
3.2.2.1 A técnica de sincronização dos dados	32
3.2.3 Extração dos fasores fundamentais	33
3.2.4 Classificação da falta	35
3.2.5 Teoria fundamental e equacionamento da técnica de localização de faltas.....	36
3.2.5.1 Cálculo da distância da falta e identificação do ramo faltoso para linhas de três terminais	36
4. SIMULAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO SOFTWARE ATP.....	43
4.1 Introdução.....	43
4.2 Gerador de dados - <i>Alternative Transients Program (ATP)</i>	44
4.2.1 Destro - <i>Interface</i> gráfica do ATP	44
4.3 Configuração do Sistema Elétrico de Potência (SEP).....	45
4.3.1 Configuração geométrica da linha de transmissão.....	45
4.3.2 Parâmetros do Sistema Elétrico de Potência	47

4.3.3 Rotina <i>line constants</i>	48
4.3.4 Arquivo de entrada de dados do ATP	49
4.4 Simulações no Sistema Elétrico de Potência	52
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS PELO ALGORÍTMO LOCALIZADOR DE FALTAS.....	55
5.1 Introdução.....	55
5.2 Simulação do “ <i>Hardware</i> ” do localizador de falta	56
5.2.1 Filtragem dos dados.....	56
5.2.1.1 Filtro passa-baixa Butterworth.....	56
5.2.2 Reamostragem dos dados	61
5.3 Testes realizados pelo algoritmo localizador de faltas	61
5.3.1 Identificação do ponto de ocorrência da falta	61
5.3.2 Extração dos fasores fundamentais das ondas de tensão e corrente através da Transformada Discreta de Fourier (TDF).....	63
5.3.3 Classificação da falta	64
5.3.4 Cálculo da distância da falta e identificação do ramo faltoso	66
5.3.4.1 Efeito dos diferentes tipos de falta	67
5.3.4.2 Efeito da resistência de falta.....	73
5.3.4.3 Efeito do ângulo de incidência de falta	82
5.3.4.4 Efeito da sincronização dos dados	86
6. CONCLUSÃO	88
6.1 Conclusão	88
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Esquema completo de um localizador de faltas	5
FIGURA 1.2 - Processo de amostragem dos sinais com dispositivos <i>sample and hold</i> na entrada de cada canal	7
FIGURA 2.1 - Diagrama unifilar para uma linha de transmissão sob falta.....	12
FIGURA 3.1 - Diagrama esquemático do algoritmo localizador de faltas	29
FIGURA 3.2 - Típicas formas de ondas de tensão e corrente pós-falta digitalizadas para um sistema faltoso, incluindo dados de pré-falta, vistas pelo terminal P (falta fase-terra (AT) distante 60 km de P, resistência de falta 5Ω e ângulo de incidência 90°).....	30
FIGURA 3.3 - Resposta em frequência do filtro TDF utilizado.....	34
FIGURA 3.4-a - Modelo de uma linha de três terminais em regime permanente de pré-falta.....	40
FIGURA 3.4-b - Modelo de uma linha de três terminais em situação faltosa no ramo L_{PT}	41
FIGURA 3.4-c - Modelo de uma linha de três terminais em situação faltosa no ramo L_{QT}	41
FIGURA 3.4-d - Modelo de uma linha de três terminais em situação faltosa no ramo L_{RT}	42
FIGURA 4.1 - Configuração do Sistema Elétrico de Potência.....	45
FIGURA 4.2 - Configuração geométrica da linha de transmissão	46
FIGURA 4.3 - Representação por parâmetros distribuídos de uma secção da linha de transmissão.....	47

FIGURA 4.4- Arquivo de entrada de dados da rotina <i>Line Contants</i>	49
FIGURA 4.5- Arquivo de entrada de dados do ATP para uma falta fase-terra	50
FIGURA 4.6 - Esquema elétrico dos elementos modelados no ATP	51
FIGURA 4.7 - Configuração dos tipos de faltas simulados.....	54
FIGURA 5.1 - Curva da amplitude de um filtro passa-baixa ideal	57
FIGURA 5.2 - Curva das respostas da amplitude do filtro Butterworth para diferentes ordens	58
FIGURA 5.3 - Curvas de atenuação dos filtros de Butterworth para diferentes ordens	59
FIGURA 5.4 - Gráfico das especificações dos filtros passa-baixa.....	59
FIGURA 5.5 - Forma de onda de tensão ruidosa com sua respectiva forma de onda filtrada pelo filtro Butterworth (resistência de falta 5 Ω e ângulo de incidência 90°).....	60
FIGURA 5.6 - Formas de ondas de tensão e corrente imediatamente após a falta e um ciclo anterior à ocorrência da mesma (resistência de falta 5 Ω e ângulo de incidência 90°)	62
FIGURA 5.7 - Formas de ondas de tensão ruidosas com suas respectivas formas ondas filtradas pela TDF para uma falta fase-terra (AT) (resistência de falta 5 Ω e ângulo de incidência 90°).....	63
FIGURA 5.8 - Formas de ondas de corrente ruidosas com suas respectivas formas ondas filtradas pela TDF para uma falta fase-terra (AT) (resistência de falta 5 Ω e ângulo de incidência 90°).....	64
FIGURA 5.9 - Classificação dos diversos tipos de falta, em diferentes localizações sobre ramo L_{PT} (resistência de falta 5 Ω e ângulo de incidência 0°).....	65
FIGURA 5.10 - Efeito dos dados não sincronizados sobre a precisão do algoritmo localizador de falta para uma falta fase-terra (AT).....	87
FIGURA 5.11 - Efeito dos dados não sincronizados sobre a precisão do algoritmo localizador de falta para uma falta fase-fase (AB).....	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - Impedância série da linha de transmissão	66
TABELA 5.2 - Efeito do tipo de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)	68
TABELA 5.3 - Efeito do tipo de falta - Falta fase-fase (AC), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)	69
TABELA 5.4 - Efeito do tipo de falta - Falta fase-fase-terra (BCT), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°).....	70
TABELA 5.5 - Efeito do tipo de falta - Falta trifásica (ABC), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)	71
TABELA 5.6 - Efeito do tipo de falta - Falta trifásico-terra (ABCT), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°).....	72
TABELA 5.7 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (1,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	74
TABELA 5.8 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (17,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	75
TABELA 5.9 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (33,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	76
TABELA 5.10 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (75,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	77
TABELA 5.11 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (100,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	78

TABELA 5.12 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (150,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	79
TABELA 5.13 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (200,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	80
TABELA 5.14 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (500,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°).....	81
TABELA 5.15 - Efeito do ângulo de incidência de falta - Falta fase-fase-terra (ABT), resistência de falta (50,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)	83
TABELA 5.16 - Efeito do ângulo de incidência de falta - Falta fase-fase-terra (ABT), resistência de falta (50,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°) ...	84
TABELA 5.17 - Efeito do ângulo de incidência de falta - Falta fase-fase-terra (ABT), resistência de falta (50,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (90°) ...	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	- Sistema Elétrico de Potência
CC	- Corrente Contínua
TP's	- Transformadores de Tensão
TC's	- Transformadores de Corrente
A/D	- Analógico/Digital
EAT	- Extra Alta Tensão
ATP	- Alternative Transients Program
TDF	- Transformada Discreta de Fourier
FDC	- Fator de Distribuição de Corrente
EMTP	- Eletromagnetic Transients Program
AT	- Falta fase(A)-terra
BT	- Falta fase(B)-terra
CT	- Falta fase(C)-terra
ABT	- Falta fase(A)-fase(B)-terra
ACT	- Falta fase(A)-fase(C)-terra
BCT	- Falta fase(B)-fase(C)-terra
AB	- Falta fase(A)-fase(B)
AC	- Falta fase(A)-fase(C)
BC	- Falta fase(B)-fase(C)
ABC	- Falta fase(A)-fase(B)-fase-(C)
ABCT	- Falta fase(A)-fase(B)-fase-(C)-terra

LISTA DE SÍMBOLOS

V_P	- tensão pré-falta no terminal P
V_Q	- tensão pré-falta no terminal Q
V_F	- tensão no ponto de falta F
$V_d(t)$	- amostras de tensão a uma distância d em relação ao terminal local
$V_P(t)$	- amostras de tensão no terminal P
$V_Q(t)$	- amostras de tensão no terminal Q
$I_P(t)$	- amostras de corrente no terminal P
I_P	- corrente pré-falta no terminal P
I_Q	- corrente pré-falta no terminal Q
I_F	- corrente no ponto de falta F
V_P''	- componente superposto de tensão no terminal P
I_P''	- componente superposto de corrente no terminal P
I_{PF}''	- componente superposto da corrente de falta do terminal P ao ponto F
I_{QF}''	- componente superposto da corrente de falta do terminal Q ao ponto F
I_a''	- componente superposto da fase A
I_b''	- componente superposto da fase B
I_c''	- componente superposto da fase C
I_0''	- componente superposto de sequência zero
Z_{SP}	- impedância da fonte do terminal P
Z_{SQ}	- impedância da fonte do terminal Q
Z_L	- impedância da linha por unidade de comprimento

Z_0	- impedância característica da linha
Y_L	- admitância da linha por unidade de comprimento
R_F	- resistência de falta
R	- resistência por unidade de comprimento da linha
L	- indutância por unidade de comprimento da linha
C	-capacitância por unidade de comprimento da linha
$[C_P]$	- matriz capacitância do terminal P
$[C_Q]$	- matriz capacitância do terminal Q
$[R_Q]$	- matriz resistência do terminal Q
$[L_Q]$	- matriz indutância do terminal Q
$[R]$	- matriz resistência da linha
$[L]$	- matriz indutância da linha
$[G_{FALT}]$	- matriz condutância no ponto de falta
$Z_{PT_{a,b,c}}$	- matriz impedância série do ramo PT (sistema de três terminais)
$Z_{QT_{a,b,c}}$	- matriz impedância série do ramo QT (sistema de três terminais)
$Z_{RT_{a,b,c}}$	- matriz impedância série do ramo RT (sistema de três terminais)
$V_{P_{a,b,c}}$	- vetor de tensão trifásico no terminal P (sistema de três terminais)
$V_{Q_{a,b,c}}$	- vetor de tensão trifásico no terminal Q (sistema de três terminais)
$V_{R_{a,b,c}}$	- vetor de tensão trifásico no terminal R (sistema de três terminais)
$V_{T_{a,b,c}}$	- vetor de tensão trifásico no terminal T (sistema de três terminais)
$V_{TP_{a,b,c}}$	- vetor de tensão trifásico no terminal T em relação a P
$V_{TQ_{a,b,c}}$	- vetor de tensão trifásico no terminal T em relação a Q
$V_{TR_{a,b,c}}$	- vetor de tensão trifásico no terminal T em relação a R
$V_{F_{a,b,c}}$	- vetor de tensão no ponto de falta F
$I_{P_{a,b,c}}$	- vetor de corrente trifásico no terminal P
$I_{Q_{a,b,c}}$	- vetor de corrente trifásico no terminal Q
$I_{R_{a,b,c}}$	- vetor de corrente trifásico no terminal R
$I_{T_{a,b,c}}$	- vetor de corrente trifásico no terminal T
L_{PT}	- comprimento do ramo PT (sistema de três terminais)
L_{QT}	- comprimento do ramo QT (sistema de três terminais)
L_{RT}	- comprimento do ramo RT (sistema de três terminais)

L_{LIN}	- comprimento da linha de transmissão de dois terminais
θ_{TP}	- ângulo de fase terminal T proveniente do terminal P
θ_{TQ}	- ângulo de fase terminal T proveniente do terminal Q
θ_{TR}	- ângulo de fase terminal T proveniente do terminal R
d_C	- distância do ponto de falta em relação ao terminal local compensada
d	- distância do ponto de falta em relação ao terminal local
p	- distância da falta por unidade de comprimento
Δx	- distância entre dois pontos consecutivos ao longo da linha
ω_c	- frequência angular de corte (rad/seg)
ω	- frequência angular (rad/seg)
γ	- constante de propagação da linha
β	- constante de fase (rad/km), $\beta = \text{Im}[\gamma]$
K_P	- fator de distribuição de corrente no terminal P
Δt	- intervalo de tempo entre amostras
t	- tempo em segundo
T	- período de tempo
1,2,3	- índices modais
a,b,c	- fases da linha
$\text{Im}[.]$	- parte imaginária de uma variável complexa
*	- componente conjugado

RESUMO

Este trabalho apresenta um método para calcular a localização de faltas em linhas de transmissão de alta tensão com três terminais. O método é baseado na utilização dos fasores de tensão e corrente trifásicos a 60 Hz, tomados nos terminais da linha e, faz uso da Transformada Discreta de Fourier (TDF) para filtragem digital das ondas. Subrotinas, como detecção da falta, sincronização dos dados provenientes dos diferentes terminais, extração dos fasores fundamentais e classificação da falta são também abordadas. O método é independente do tipo de falta e insensível às variações da impedância da fonte e a resistência de falta e também despreza a capacitância *shunt* da linha. A técnica proposta foi testada usando dados obtidos através de simulações do programa Alternative Transients Program (ATP), para uma variedade de condições, aplicando-se diversas localizações, resistências, ângulos de incidência e diferente tipos de faltas, a fim de cobrir as diversas situações comuns a uma linha de transmissão. Os resultados dos testes obtidos são apresentados e demonstraram um alto grau de precisão, destacando-se a confiabilidade e aplicabilidade do algoritmo proposto.

Palavras-chave: localização de faltas; linhas de múltiplos terminais.

ABSTRACT

This work presents a method to calculate the fault location in three-terminal high voltage transmission lines. The method is based on the three-phase current and voltage 60 Hz phasors taken at the line terminals and it makes use of Discrete Fourier Transform (DFT) for digital filtering of the waves. Subroutines for fault detection, data synchronisation, extraction the fundamental phasors and fault classification are also described. The method is independent of fault type and insensitive to source impedance variation and fault resistance and totally ignores the lines *shunt* capacitance. The proposed technique was tested using data obtained through simulations of the *Alternative Transients Program* (ATP), for a variety of such as different location, fault resistance, inception angles and types of fault. The test results demonstrated a high degree of accuracy, reliability and applicability of the proposed algorithm.

Keywords: Fault Locators; multi-terminal lines.

Capítulo 1

Introdução

1.1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um dos recursos fundamentais para o desenvolvimento de diversas áreas como: industriais, agrícolas, comerciais e domésticas. Dessa forma, manter um alto grau de confiabilidade na continuidade do fornecimento de energia elétrica, para os diferentes tipos de consumidores, tornou-se uma das principais necessidades de um Sistema Elétrico de Potência (SEP). Contudo, faltas elétricas podem ocorrer em qualquer ponto de um SEP, ocorrendo mais frequentemente nas linhas de transmissão aéreas que são as partes mais expostas do sistema. As linhas de transmissão são também consideradas uma das partes mais difíceis para monitoramento e manutenção, devido a sua extensão e o ambiente em que se encontram (SAHA & ERIKSSON, 1985).

Utilizar dispositivos baseados em microprocessadores nas soluções de problemas de SEP tem sido um assunto de grande importância nos últimos anos. As razões pelas quais isso ocorre são devidas ao rápido avanço da tecnologia dos microprocessadores, aliado aos desenvolvimentos obtidos na área de *software*, tornando-se cada vez mais apropriados para aplicações em situações como a localização digital de faltas, onde, é necessário um alto grau de precisão nos resultados. O desempenho dos dispositivos analógicos para tal fim, usados

anteriormente, não era muito satisfatório e exigia uma constante manutenção, bem como operadores especializados.

1.2 LOCALIZADORES DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Na ocorrência de uma falta em linhas de transmissão, os relés de distância fornecem algumas indicações da área em que a falta ocorreu, mas não são projetados para indicar a localização exata da mesma, uma vez que os disjuntores do circuito de potência estão somente instalados nos terminais da linha, não importando para eles onde encontra-se a posição da falta (ERIKSSON et al. 1985).

O imediato conhecimento da localização da falta na linha de transmissão permite uma rápida determinação da natureza da falta, facilitando os reparos e a restauração da linha do sistema, sendo isso de vital importância para a operação econômica do sistema de potência. As faltas podem ocorrer na forma de curto-circuito entre os condutores e a terra, geralmente provocando danos mecânicos na linha. A rápida localização de faltas permanentes, facilita os reparos e a manutenção, enquanto que a localização de faltas transitórias ou temporárias, ajudam a prevenir futuros problemas.

Um localizador de faltas pode ser implementado de três maneiras possíveis (MOORE et al. 1995). Sendo essas:

- (a) Como um dispositivo *stand-alone* - o localizador de faltas possui um *hardware*, similar ao de um relé digital;
- (b) Como parte de um relé de proteção digital - neste caso, o algoritmo do localizador de faltas é incluído juntamente com o algoritmo do relé de proteção;
- (c) Como um algoritmo independente - em conjunção com o registrador digital de faltas, usando os dados de pós-falta obtidos através do mesmo.

Os localizadores de faltas processam dados registrados digitalmente de modo *off-line* e, por essa razão não estão sujeitos às restrições de processamento impostas aos relés de proteção, que devem operar em modo *on-line*. Isso permite um aumento na sofisticação dos algoritmos e, portanto, na precisão relacionada à localização digital de faltas. Isso é particularmente desejável para linhas de transmissão longas ou

localizadas em terrenos acidentados, onde poucos quilômetros de imprecisão podem comprometer a continuidade do fornecimento de energia (GAUTIER, 1996).

O projeto dos localizadores de faltas, baseados em microprocessadores, inclui a escolha do *hardware* e do algoritmo adequado para implementar a técnica selecionada. Várias abordagens foram desenvolvidas e diferentes princípios já foram aplicados ao problema da localização digital de faltas nas linhas de transmissão. No entanto, as técnicas podem ser classificadas em duas categorias: (i) dados observados em um único terminal e (ii) dados observados nos múltiplos terminais da linha.

Técnicas de localização de faltas que utilizam dados provenientes de apenas um terminal da linha, geralmente apresentam um comprometimento quanto a precisão em relação à simplicidade de como os dados são obtidos. A maior parte dessas técnicas são baseadas nos modelos de linhas de parâmetros concentrados, com objetivo de encontrar a impedância complexa do sistema na direção da falta como vista do local de medida, na qual a distância da falta pode ser deduzida. O conceito de impedância complexa refere-se, somente para frequências fundamentais de tensão e corrente extraídas por filtros, análises de Fourier ou através de outros meios para remover os componentes de alta frequência e de Corrente Contínua (CC), provenientes das formas de ondas faltosas registradas. As estimativas para essas localizações de faltas são propensas a imprecisões se houver contribuições à corrente de falta pelas fontes conectadas a ambos os terminais da linha, especialmente na presença da resistência de falta. Melhorias foram apresentadas nesses tipos de abordagens por alguns autores, e maiores detalhes podem ser vistos no capítulo 2.

Quando dados provenientes dos múltiplos terminais da linha são utilizados, torna-se possível superar alguns problemas comuns associados com a localização das faltas. Sobre esse assunto, deve ser mencionado que é necessária a comunicação entre os terminais para transmitir os dados de faltas registrados para processamento no terminal referência. Contudo, ao contrário da detecção da falta, que opera em modo *on-line* e, por essa razão exige alta velocidade e canais de comunicação contínuos, os requisitos de comunicação para os localizadores de faltas são muito mais simples, pois operam em modo *off-line* (COURY, 1992).

1.2.1 A IMPORTÂNCIA DOS LOCALIZADORES DE FALTAS

Até mesmo onde os helicópteros estão disponíveis para patrulhar as linhas de transmissão em condição faltosa, os localizadores de faltas realizam um valioso trabalho. Em determinadas situações, mesmo com uma patrulha de rotina, a localização de uma falta em uma linha de transmissão não é passível de solução quando não se tem uma indicação de onde a falta ocorreu. Por exemplo, quando temos uma linha de transmissão passando em regiões de difícil acesso e com pouca visibilidade, uma indicação da posição da falta é um fator importante para a resolução do problema (ERIKSSON et al. 1985).

A importância dos localizadores de faltas é ainda mais óbvia quando não se possui helicópteros disponíveis e, as patrulhas são predominantemente realizadas a pé, particularmente em linhas longas e em terrenos acidentados. Além disso, os localizadores podem ajudar onde a manutenção da jurisdição é dividida entre diferentes companhias ou entre divisões dentro da mesma companhia.

Localizadores de faltas são extremamente importantes em ocasiões onde a linha tenha sido restaurada automaticamente ou não. Nessas categorias, os defeitos mais comumente encontrados são: do tipo elétrico (chaveamento, descargas atmosféricas, sobretensões, curtos-circuitos), mecânicos (ventos, poluição), térmico (sobrecorrente, sobretensão) e de isolamento (instalação imprópria, defeitos de fabricação e erros de projetos de isoladores).

O localizador de faltas permite uma chegada rápida no local antes mesmo que as evidências sejam removidas. Além disso, o conhecimento de que repetitivas faltas estão ocorrendo na mesma área pode ser valioso na descoberta do problema. Pontos fracos que não são óbvios podem ser também encontrados, pois uma inspeção mais completa pode ser focalizada na área limitada definida pelo localizador de faltas.

1.2.2 *HARDWARE* PARA LOCALIZADORES DIGITAIS DE FALTAS

O esquema completo de um localizador de faltas é mostrado na Fig. 1.1. O diagrama mostra os vários estágios existentes pelos quais os dados provenientes da

linha de transmissão deverão passar antes do processamento do algoritmo de localização de faltas.

FIGURA 1.1 - Esquema completo de um localizador de faltas

1.2.2.1 TRANSDUTORES DE TENSÃO E CORRENTE

Os sinais de entrada são atenuados através de Transformadores de Tensão (TP's) e Transformadores de Corrente (TC's), para que estejam em um nível computacional compatível, a fim de serem convertidos à forma digital, através de um conversor Analógico/Digital (A/D).

1.2.2.2 MÓDULO DE INTERFACE

Depois que os sinais de tensão e corrente forem atenuados pelos TP's e TC's, os mesmos entram em um módulo de *interface*, onde os sinais serão novamente atenuados, para finalmente atingirem níveis adequados para a digitalização. Nessa etapa é realizada ainda a conversão dos sinais de corrente em sinais de tensão, pois os microprocessadores trabalham somente com esses sinais (GHERALDE, 1996).

Esse módulo, possui também, filtros passa baixa para evitar o fenômeno denominado sobreposição de espectros (*aliasing*). O problema de sobreposição de espectros é uma fonte de erro da conversão A/D. Para evitar esse problema, utilizam-se filtros *anti-aliasing*, que devem ser filtros passa baixa com frequência de corte menor ou igual à metade da taxa amostral utilizada pelo conversor. Os filtros podem ser passivos, constituídos exclusivamente de capacitores e resistores, ou ativos, utilizando amplificadores operacionais.

1.2.2.3 MÓDULO DE SINCRONIZAÇÃO

O módulo de sincronização dos sinais é composto por dispositivos *sample and hold* na entrada de cada canal, e por um multiplexador. Os dispositivos *sample and hold* têm a função de segurar, manter as amostras até o instante de amostragem que é determinado por um *clock*, no qual deve produzir pulsos em uma taxa fixa. Para cada instante definido pelo *clock*, ocorre uma conversão dos valores instantâneos dos sinais analógicos de entrada em uma forma digital. O multiplexador faz com que os sinais utilizados na conversão sejam processados por um único conversor A/D

(AGGARWAL et al. 1993). A Fig. 1.2 mostra o processo de amostragem de múltiplos sinais com dispositivos *sample and hold* adicionados em cada canal.

FIGURA 1.2 - Processo de amostragem dos sinais com dispositivos *sample and hold* na entrada de cada canal.

1.2.2.4 CONVERSÃO ANALÓGICO/DIGITAL (A/D)

Esse conversor transforma sinais contínuos no tempo (analógicos) em sinais discretos no tempo (digitais). Os sinais são obtidos tomando o valor dos sinais analógicos em intervalos de tempo iguais.

O principal aspecto do conversor é sua resolução expressa em *bits*. Isso afeta a capacidade do conversor de representar o sinal analógico com suficiente precisão para a representação digital. A representação digital é realizada em níveis de quantização, calculada pela fórmula 2^n , sendo n o número de *bits* do conversor.

Claramente é notado que quanto maior o número de *bits* do conversor, menor o erro cometido na conversão, fornecendo assim, uma representação mais perfeita do sinal.

1.2.2.5 DISPOSITIVOS DE MEMÓRIA

Os dispositivos de memória tem a função de registrar os dados de falta após a conversão A/D. Em seguida, esses dados são enviados para o microcomputador, onde se dará o processamento do algoritmo localizador de faltas.

1.2.2.6 MICROCOMPUTADOR

O microcomputador é o elemento designado para processar o algoritmo localizador de faltas, após receber todas informações obtidas pelo(s) registrador(es) de faltas. Ele também é responsável pela manutenção de outras funções e comunicação com equipamentos periféricos.

1.3 LINHAS DE MÚLTIPLOS TERMINAIS

Linhas de múltiplos terminais, nas quais um novo terminal alimentador é conectado a uma linha de transmissão já existente, oferecem vantagens econômicas consideráveis e, benefícios ambientais sobre as linhas de transmissão de dois terminais para sistemas de transmissão de Extra Alta Tensão (EAT). Existe um conflito natural entre a crescente demanda por energia e, as conexões para novos pontos de geração com a grande dificuldade em se construir novas linhas de EAT. Nesse sentido, um circuito com três terminais oferece uma alternativa de baixo custo e bastante atrativa.

É de conhecimento geral que tais linhas são de difícil proteção, usando-se esquemas de proteção convencionais. Nesse sentido, o advento de canais de comunicação de fibra ótica entre os três terminais, tem possibilitado a proteção de tal configuração. Com a popularização de esquemas de proteção para circuitos com três terminais, uma crescente demanda por técnicas de localização de faltas para tais circuitos pode ser notada nos dias atuais (COURY, 1992).

1.4 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo investigar uma abordagem para localizar, precisamente, faltas em linhas de transmissão de múltiplos terminais. O método baseado na utilização de formas de ondas de tensão e corrente trifásicas a 60 Hz, tomados nos três terminais da linha, será descrito detalhadamente etapa por etapa, utilizando-se de várias teorias, incluindo o equacionamento apresentado por GIRGIS et al. (1992a). O algoritmo implementado será testado usando-se dados obtidos através de simulações do *software* “Alternative Transients Program” (ATP). Para as simulações aplicadas a este *software*, para um sistema de transmissão de 400 kV, serão consideradas várias condições do sistema, aplicando-se diversas localizações, resistências, ângulos de incidência e diferentes tipos de falta. Os resultados a serem apresentados evidenciarão a aplicabilidade e confiança do método proposto.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica referente às várias técnicas de localização de faltas para linhas de transmissão. As técnicas revistas são inicialmente classificadas em dois grupos: (i) para linhas de transmissão de dois terminais e (ii) para linhas de transmissão de três terminais. O primeiro grupo é dividido em duas categorias. Na primeira categoria, os algoritmos utilizam informações provenientes de somente um terminal, e na segunda, os algoritmos utilizam informações provenientes de ambos terminais da linha faltosa. No segundo grupo são mostradas técnicas para localização de faltas em configurações de linhas de três terminais.

No capítulo 3 é descrito um método para calcular a localização de faltas em linhas de transmissão de alta tensão com três terminais. Os diferentes estágios envolvendo o algoritmo de localização de faltas são apresentados, desde a obtenção dos dados utilizados, até o cálculo da distância da falta, bem com a identificação do ramo faltoso. As etapas intermediárias, como a detecção da falta, sincronização dos dados, extração dos fasores fundamentais e a classificação da falta, são também

abordadas. Toda teoria, relacionada a cada etapa anteriormente mencionada, é descrita detalhadamente.

No capítulo 4 é desenvolvida a modelagem do SEP, através dos cálculo de parâmetros distribuídos, bem como os tipos de simulações realizadas através do *software* ATP. A configuração geométrica da linha de transmissão e do SEP são também apresentadas.

No capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos pelo algoritmo localizador de faltas para uma variedade de condições, aplicando-se diversas localizações, resistências, ângulos de incidência e diferentes tipos de falta, assim como a discussão dos mesmos. Além disso, são feitas algumas considerações sobre a eficácia do método.

No capítulo 6 são relatadas as conclusões do trabalho, destacando-se as vantagens da técnica abordada.

Capítulo 2

Estado da Arte - Técnicas de Localização de Faltas para Linhas de Transmissão

Neste capítulo apresentam-se algumas técnicas de localização digital de faltas para linhas de transmissão de dois e três terminais.

2.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas técnicas de localização digital de faltas para linhas de transmissão utilizando dispositivos baseados em microprocessadores, tem sido um assunto de grande interesse para pesquisadores e engenheiros de potência nos últimos anos, com a finalidade de melhorar a precisão das localizações de faltas em linhas de transmissão.

As técnicas de localização digital de faltas, revistas neste capítulo, são inicialmente classificadas em dois grupos: (i) para linhas de transmissão de dois terminais e (ii) para linhas de transmissão de três terminais. O primeiro grupo é dividido em duas categorias. Na primeira categoria os algoritmos utilizam informações provenientes de somente um terminal, e na segunda os algoritmos utilizam informações provenientes de ambos terminais da linha faltosa.

2.2 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA LINHAS DE DOIS TERMINAIS

A Fig. 2.1 apresenta um diagrama unifilar de um sistema sob falta, representado por uma linha de transmissão com dois terminais, o qual será útil para ilustrar os fundamentos básicos em que se baseiam as técnicas de localização de faltas mostradas neste grupo. As técnicas a serem descritas neste capítulo têm a finalidade de expressar, apenas, a metodologia básica do referido assunto.

FIGURA 2.1 - Diagrama unifilar para uma linha de transmissão de dois terminais sob falta

2.2.1 ALGORÍTMOS QUE UTILIZAM DADOS PROVENIENTES DE SOMENTE UM TERMINAL DA LINHA

Algoritmos que utilizam dados disponíveis de somente um terminal da linha de transmissão, geralmente utilizam a impedância aparente e as correntes de pré-falta para calcular a localização da falta. Correntes provenientes dos alimentadores remotos e as resistências de falta, são fontes de erros nesses tipos de algoritmos de localização de faltas.

TAKAGI et al. (1981) apresentaram um algoritmo de localização baseado no método de Newton-Raphson para uma linha de EAT. A técnica faz uso de ondas de tensão e corrente apenas no terminal local, as quais são posteriormente filtradas através da técnica da Transformada Discreta de Fourier (TDF), a fim de obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime permanente. A técnica utiliza componentes superpostos e modais de tensão e corrente, ao invés de valores totais para o cálculo da distância da falta. Isso permite que o sistema trifásico seja tratado como um sistema com três circuitos monofásicos independentes uns dos outros, e assim, simplificando consideravelmente os cálculos necessários.

Para uma linha monofásica, aplicando-se a teoria da superposição em redes lineares, isto é, separando-se a rede faltosa em duas redes derivadas (uma rede de pré-falta e uma rede em que a falta foi isolada) obteremos o vetor tensão V_F no ponto de falta para ser:

$$V_F = R_F \times I_F = -R_F(I''_{PF} + I''_{QF}) \quad (2.1)$$

Onde V_F e I''_{PF} são expressados usando valores, os quais, podem ser observados no terminal local da linha:

$$V_F = V_P \cosh(\gamma d) - Z_0 I_P \sinh(\gamma d) \quad (2.2)$$

$$I''_{PF} = (V_P'' / Z_0) \sinh(\gamma d) - I_P'' \cosh(\gamma d) \quad (2.3)$$

A partir de uma série de substituições na eq.(2.1) envolvendo as eq.(2.2 e 2.3) obteve-se a seguinte equação básica do localizador de faltas definida como:

$$\text{Im}\left[\frac{V_P \cosh(\gamma d) - Z_0 I_P \sinh(\gamma d)}{(V_P'' / Z_0) \sinh(\gamma d) - I_P'' \cosh(\gamma d)}\right] = 0 \quad (2.4)$$

Onde $\text{Im}[\cdot]$ representa a parte imaginária de uma variável complexa. A solução d da eq.(2.4) é a distância do ponto da falta ao terminal local. A eq.(2.4) é uma

equação não linear, sendo necessário a técnica iterativa de Newton-Raphson para resolvê-la.

TAKAGI et al. (1982) desenvolveram uma técnica aproximada de localização de faltas, na qual calcula-se a reatância da linha faltosa, usando a representação dos fasores de tensão e corrente no terminal local da linha de transmissão. Erros causados por vários fatores como correntes provenientes dos alimentadores remotos, resistência de falta, e disposição não simétrica da linha de transmissão foram reduzidos através de correções.

O método para o cálculo da distância até o ponto de falta é baseado nas eq.(2.2 e 2.3), as quais como mencionadas anteriormente, expressam a tensão V_F e a corrente I''_{PF} no ponto de falta, usando apenas os dados do terminal local. Através de duas aproximações adotadas nas eq.(2.2 e 2.3): $\tanh(\gamma d) \cong \gamma d$, levando-se em consideração a linha de transmissão ser curta e, os ângulos da corrente de falta I_F e da corrente do terminal local I''_{PF} serem iguais, a distância d pode ser obtida com a seguinte expressão simplificada:

$$d = \frac{\text{Im}(V_P \times I''_P^*)}{\text{Im}(Z_L I_P \times I''_P^*)} \quad (2.5)$$

Na eq.(2.5), o efeito do fluxo de carga é cancelado pelo uso da componente da corrente de falta I''_P , e o efeito da resistência de falta desconhecida é reduzido, eliminando-se a resistência de falta R_F , mas para tal eliminação, o algoritmo faz a hipótese que, os ângulos da corrente de falta total e da corrente de contribuição de falta do alimentador do terminal remoto são iguais, ou senão, assumem que a diferença entre esses ângulos é conhecida e constante ao longo do segmento da linha. Para essa hipótese os erros substanciais podem aumentar no cálculo da distância da falta, devido a diferença entre os dois ângulos, que geralmente pode variar com a distância da falta.

A Toshiba Corporation implementou comercialmente um localizador de faltas desenvolvido por MURUOKA et al. (1984) de alta exatidão para linhas de transmissão aéreas utilizando microprocessador.

O método utilizou basicamente os mesmos princípios realizados por TAKAGI et al. (1982), apresentando alguns melhoramentos através de uma compensação na distância de falta, pela constante de propagação. O princípio fundamental na eq.(2.5) é calcular a distância da falta, assumindo a impedância da linha como uma constante concentrada. Contudo, na realidade, a impedância da linha é uma constante distribuída. Por essa razão, quando a linha torna-se longa, os erros resultantes de aproximações são corrigidos pela eq.(2.6), através da constante de propagação para circuitos constantes distribuídos:

$$d_c = d - \beta^2 \times \frac{d^3}{3} \quad (2.6)$$

Testes de campo mostraram bom desempenho do localizador de faltas, principalmente para faltas fase-terra que foram localizadas com grande exatidão.

ERIKSSON et al. (1985) descreveram uma técnica de localização de faltas usando o Fator de Distribuição de Corrente (FDC), na qual determinam o ângulo da tensão no ponto de falta e a distância de falta. Esta técnica apresenta mais vantagens do que o método aproximado de TAKAGI et al. (1982), uma vez que, o aspecto principal desta técnica é fazer considerações das influências dos efeitos de ambos terminais da linha usando o modelo completo da rede. Amostras de corrente de carga pré-falta são armazenadas e usadas para compensação, de tal forma eliminando o efeito substancial na exatidão. Além disso, valores representativos para a impedância da fonte são também armazenados, para compensar as variações nos ângulos das impedâncias e, determinar uma correta descrição da rede. O valor de R_F desconhecido não é necessário, somente o ângulo de $R_F \times I_F$ da tensão, no ponto de falta, é usado.

O cálculo da localização determina a impedância aparente da falta com uma compensação para a queda de tensão na resistência de falta, eliminando erros na medição convencional do tipo à reatância. Como a impedância de sequência positiva não depende da resistência do pé da torre e, nem da resistência do solo, as componentes da corrente de sequência zero foram eliminadas e, somente as componentes da corrente de sequência positiva e negativa foram usadas. A partir de todo um equacionamento foi obtida a eq.(2.7) na qual foi introduzido o FDC (K_P):

$$V_P = I_P p Z_L + \left(\frac{I_{PF}}{K_P}\right) R_F \quad (2.7)$$

Onde I_{PF} varia conforme o tipo de falta e representa a mudança na corrente produzida pela falta, que é igual a atual corrente de falta, menos a corrente de pré-falta. O FDC (K_P) é definido pela eq.(2.8), como função da localização da falta dos parâmetros de sequência positiva da linha e, da impedância da fonte:

$$K_P = \frac{(1-p)Z_L + Z_{SQ}}{Z_{SP} + Z_L + Z_{SQ}} \quad (2.8)$$

Substituindo a eq.(2.8) na eq. (2.7) foi obtida a seguinte expressão complexa (2.9) que contém as variáveis p e R_F desconhecidas:

$$p^2 - pK_1 + K_2 - K_3 R_F = 0 \quad (2.9)$$

Onde:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{V_P}{I_P Z_L} + 1 + \frac{Z_{SQ}}{Z_L} \\ K_2 &= \frac{V_P}{I_P Z_L} \times \left(\frac{Z_{SQ}}{Z_L} + 1\right) \\ K_3 &= \frac{I_{PF}}{I_P Z_L} \times \left(\frac{Z_{SP} + Z_{SQ}}{Z_L} + 1\right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Separando a equação complexa (2.9) em uma parte real e outra imaginária, são obtidas duas equações simultâneas. Eliminando a resistência de falta R_F , que é desconhecida, resulta apenas uma expressão simples com uma única variável desconhecida p . Isso é solucionado por um programa usando os valores de pico e suas posições de fase, realizados por uma rotina baseada na análise de Fourier que produz os componentes fundamentais dos sinais.

KOHLAS (1973) propôs um novo método que calcula o perfil da tensão ao longo da linha de transmissão, ao invés dos métodos que injetam um pulso elétrico dentro do segmento da linha faltosa e, fazem os registros dos sinais refletidos subsequentes ou, dos métodos que registram tensão e corrente nos pontos de releamento de um sistema energizado, dentro dos primeiros milisegundos após o início da falta.

A técnica atribui que a tensão no ponto de falta possui um valor mínimo, e dessa maneira, possibilita a comparação dos valores de tensão em diferentes pontos ao longo da linha, provendo bases para localizar a falta. As formas de ondas de tensão ao longo da linha são computadas pelo uso de equações telegráficas. A função $F(d)$ na eq.(2.11) é proporcional à função integral do quadrado da tensão, sobre um intervalo de tempo limitado para a localização de faltas, e é calculada ao longo da linha, possuindo um valor mínimo no ponto onde a falta ocorre:

$$F(d) = \frac{2}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} [V_d(t)]^2 dt \quad (2.11)$$

Esta técnica apresenta problemas quando o ângulo de incisão da falta for próximo de zero, não existindo nenhum valor mínimo para $F(d)$ ao longo da linha. Sendo assim esta função falhará em localizar a falta.

IBE & CORY (1986) conduziram estudos teóricos e experimentais mostrando que o método citado anteriormente, pode ser aplicado em localização digital de faltas. Eles apresentaram esta técnica de localização de faltas, baseando-se nos princípios de ondas viajantes. Um modelo matemático avançado da linha de transmissão foi

utilizado para desenvolver o método de localização de faltas, no qual confronta-se com transitórios de alta frequência. Este modelo foi usado para a localização de faltas de uma única fase. As equações telegráficas, usadas para modelar a linha de transmissão de uma única fase, foram caracterizadas pelo seguinte conjunto de equações diferenciais parciais hiperbólicas:

$$\frac{\partial V}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} = -RI \quad (2.12)$$

$$C \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

Onde, R , L , e C são resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento da linha, respectivamente; V e I são amostras de tensão e corrente obtidas no terminal local da linha.

As eq.(2.12 e 2.13) foram resolvidas através de métodos característicos, usando amostras de tensão e corrente como condições limites, tomadas apenas no terminal local da linha dentro dos primeiros milissegundos da incisão da falta.

Estimativas do perfil de tensão e corrente para o comprimento total da linha de transmissão foram obtidas. O critério de localização foi baseado na formulação envolvendo estas estimativas de tensão e corrente. Funções médias de tempo F_1 , F_2 , F_3 , na eq.(2.14) envolvendo o quadrado da tensão, o quadrado da corrente ou o produto das duas respectivamente, foram designadas para produzir o retrato da variação da tensão e da corrente seguidas da incisão da falta:

$$\begin{aligned} F_1(d) &= \frac{1}{T-2\gamma d} \int_{\gamma d}^{T-\gamma d} V^2(d, t) dt & d < T/2\gamma \\ F_2(d) &= \frac{1}{T-2\gamma d} \int_{\gamma d}^{T-\gamma d} I^2(d, t) dt & d < T/2\gamma \\ F_3(d) &= \frac{1}{T-2\gamma d} \int_{\gamma d}^{T-\gamma d} |V^2(d, t) \times I^2(d, t)| dt & d < T/2\gamma \end{aligned} \quad (2.14)$$

A posição da falta d é indicada pela variação do pico na tangente para qualquer uma das três funções médias de tempo da eq.(2.14). As funções tangentes

G(d) são definidas pelas derivadas segundas das funções média de tempo. Plotando-as, tipicamente produz um diagrama, no qual o ponto máximo, provavelmente corresponde à posição da falta.

IBE & CORY (1987) a partir do modelo que foi usado para a localização de faltas de uma única fase, estenderam o conceito pelo uso de análise modal para cobrir a localização de faltas no sistema trifásico. Resolvendo as equações diferenciais parciais hiperbólicas, que caracterizam o modelo de uma linha de transmissão trifásica em dois estágios: primeiro as matrizes foram diagonalizadas para a aplicação do conceito de análise modal, e em seguida, as equações resultantes foram resolvidas pelo método característico, da mesma maneira como no modelo de uma única fase.

Um outro método de localização de faltas utilizando dados de um único terminal da linha, e estimando parâmetros do sistema dinâmico é apresentado por RICHARDS & TAN (1982). O sistema de equações diferenciais é baseado no modelo de linha de parâmetros concentrados, nos equivalentes de Thevenin para transitórios em ambos terminais da linha e na desconhecida resistência de falta. As equações são simplificadas usando componentes simétricos. A estimação do algoritmo não exige filtragem dos componentes CC, nem dos componentes de alta frequência.

O problema de localização de faltas é tratado como um problema de estimação de parâmetros do sistema dinâmico, no qual, a resposta do sistema físico é comparada com o modelo de parâmetros concentrados. Os parâmetros do modelo são variados, até que uma combinação adequada seja obtida com a resposta física do sistema. Esses resultados são identificados não somente para a distância da falta, mas também para a resistência de falta, a qual, pode ser ou não, de interesse.

MORRISON & YANG (1987) também desenvolveram um método de localização de faltas baseado na equação diferencial da linha. A equação da falta é baseada na tensão e na corrente instantânea de um dos terminais do sistema. A técnica despreza o efeito da capacitância em paralelo.

A maior parte dos algoritmos de localização de faltas utilizam fasores de tensão e corrente, representados no domínio da frequência para determinar a distância da falta nas linhas de transmissão. LAWRENCE & WASER (1988) descreveram um método que difere desses algoritmos que utilizam os fasores no domínio da frequência, devido ao fato, do uso dos fasores de tensão e corrente, serem representados no domínio do tempo. O método empregado é baseado nas técnicas de transformada Z para modelos de resposta do sistema à ocorrência de uma falta, e assume uma relação no domínio do tempo entre os dados amostrados e os parâmetros da rede. A eq.(2.15) expressa a relação entre os parâmetros desconhecidos (distância para a falta e resistência de falta), e os valores conhecidos do sistema (resistência, capacitância, indutância e a transformada Z das amostras de tensão e corrente):

$$f([R],[L],[C_p],[C_q],[R_q],[L_q],V_p(t),I_p(t),V_q(t),[G_{FALT}],p,p^2) = 0 \quad (2.15)$$

As características da linha e da fonte são armazenadas *off-line*, e posteriormente recuperadas pelo algoritmo de localização. Dados amostrados de tensão e corrente, instantes antes da inicialização da falta, são usados para computar a tensão na fonte equivalente do terminal remoto. A tensão no terminal remoto é obtida por uma rotina baseada no cálculo dos coeficientes de Fourier, e posteriormente, convertida para valores amostrais no tempo.

Uma janela de dados específica de falta visualizada graficamente e escolhida pelo usuário, após a ocorrência de uma falta, é empregada para a estimação da localização da falta em cada ponto amostrado. As expressões da eq.(2.16) são determinadas através da transformada Z, aplicada aos dados amostrados, produzindo um conjunto de equações não lineares simultâneas, envolvendo os parâmetros do sistema, tensões e correntes amostradas no domínio do tempo, e as desconhecidas distância da falta e resistência de falta:

$$[A] \times \begin{bmatrix} p \\ p^2 \\ R_F \end{bmatrix} = [0] \quad (2.16)$$

Na eq.(2.16), A é uma matriz 2×3 construída de valores conhecidos da eq.(2.15). O par de equações não lineares simultâneas da eq.(2.16) é resolvido para obter a distância da falta p e resistência de falta R_F de uma maneira iterativa, empregando-se o método de Newton.

O método precisa de uma iteração com o usuário, com o intuito de monitorar a linha constantemente, a fim de obter os dados faltosos em poucos instantes, tão logo a falta ocorra.

WESTLIN & BUBENKO (1976) utilizam técnicas iterativas para encontrar a posição da falta nas linhas de transmissão. O método emprega a avaliação da forma de onda da frequência fundamental, e considera a influência do terminal remoto definindo um modelo abstrato para o mesmo, gerando um conjunto de equações não lineares, contendo a distância de falta como uma variável, isso sendo realizado para cada tipo de falta. Essas equações não lineares são, então, solucionadas usando-se a técnica iterativa de Newton-Raphson.

2.2.2 ALGORÍTMOS QUE UTILIZAM DADOS PROVENIENTES DE AMBOS OS TERMINAIS DA LINHA

Com a finalidade de melhorar a precisão da computação na localização de faltas em linhas de transmissão, muitos autores propõem algoritmos que utilizam informações de dados observados em ambos os terminais da linha. Essas técnicas, geralmente, são independentes da impedância de falta e de mudanças na configuração das fontes dos sistema de potência. Por outro lado, torna-se necessário haver um meio de comunicação entre os terminais, bem como um método para determinação dos ângulos de fase das tensões e correntes, em relação a um eixo de referência comum. A localização da falta só poderá ser determinada precisamente se as medições em ambos os terminais forem sincronizadas.

SCHWEITZER & JACHINOWSKI (1981) e SCHWEITZER (1982) apresentaram uma técnica de localização de faltas, utilizando tensão e corrente em regime permanente, proveniente dos dois terminais da linha faltosa. Uma primeira abordagem é usada para um modelo de linha curta. As tensões no ponto F, usando dados dos barramentos P e Q (Fig. 2.1) são dadas pelas eq.(2.17 e 2.18):

$$V_F = V_P - pZ_L I_P \quad (2.17)$$

$$V_F = V_Q - (1-p)Z_L I_Q \quad (2.18)$$

Equacionando-as de modo a eliminar V_F , obtém-se o resultado:

$$p = \frac{(V_P - V_Q) + Z_L I_Q}{Z_L (I_P + I_Q)} \quad (2.19)$$

A eq.(2.19) fornece o valor de p , usando valores em regime permanente para correntes e tensões, e representa a distância fracional ao ponto de falta.

A aproximação para linha curta assume que as correntes em ambos terminais da linha são as mesmas sob condições normais (sem a ocorrência de faltas). Isso produz a condição para pré-falta:

$$I_Q = -I_P \quad (2.20)$$

Logo, a observação da corrente pré-falta produz uma relação de fase entre os *clocks* nas duas subestações, tornando possível a sincronização dos dados para a obtenção da precisão máxima.

Onde a aproximação para linha curta não é justificada, a dedução pode ser repetida usando-se equações com parâmetros distribuídos. As eq.(2.17 e 2.18) são substituídas por:

$$V_F = V_P \cosh(\gamma p L_{LIN}) - Z_0 I_P \cosh(\gamma p L_{LIN}) \quad (2.21)$$

$$V_F = V_Q \cosh[\gamma(1-p)L_{LIN}] - Z_0 I_Q \sinh[\gamma(1-p)L_{LIN}] \quad (2.22)$$

Onde:

$$\gamma = (Z_L Y_L)^{1/2} \quad (2.23)$$

$$Z_0 = (Z_L / Y_L)^{1/2} \quad (2.24)$$

A solução obtida para a localização da falta, usando as eq.(2.21 e 2.22) e aproximações de primeira ordem para as exponenciais das funções hiperbólicas, fica:

$$p = \frac{[(V_P - V_Q) - Z_0 \gamma L_{LIN} I_Q]}{[Z_0 \gamma L_{LIN} (I_P + I_Q) - (V_P - V_Q)(\gamma L_{LIN}) - (V_Q + Z_0 I_Q)(\gamma L_{LIN})^2]} \quad (2.25)$$

$$\text{Onde: } Z_0 \gamma L_{LIN} = Z_L.$$

Uma estimativa da corrente de pré-falta I_Q no terminal P é necessária para a sincronização dos *clocks*. Usando as mesmas aproximações, a estimativa é:

$$I_{QP} = V_P[\gamma L_{LIN} / Z_0] - I_P \quad (2.26)$$

Onde, I_{QP} denota uma estimativa para a corrente do terminal Q, no terminal P.

O método para dois terminais descrito acima não requer valores para os parâmetros do sistema externo à linha de transmissão monitorada. Não são apresentados resultados com referência à técnica mencionada acima. Na realidade, a precisão pode ser limitada por alguns fatores, tais como: grau de fidelidade do modelo da linha usado na implementação, precisão com que os parâmetros da linha são determinados, e pelos *hardwares* e *softwares* usados, o que inclui eficiência do método de filtragem digital para obtenção dos valores em regime permanente.

JEAYASURYA & RAHMAN (1989) se basearam na eq.(2.19) para estimar a localização de faltas em linhas de transmissão. Eles também fizeram uso de um método para determinar o ângulo de fase entre as correntes dos relés relativos a um eixo de referência comum.

A eq.(2.19) despreza a capacitância em paralelo nas linhas de transmissão. Para linhas EAT longas, onde correntes de carga são substanciais, os autores afirmam que o método resultará em uma estimativa altamente precisa para a localização de uma falta, visto que os transitórios de alta frequência, originados pela capacitância em paralelo, são eliminados através de filtros adequados.

Uma estimativa precisa da posição da falta é obtida com um ciclo de dados pós-falta, quando a capacitância da linha é desprezada. Levando-se em conta essa capacitância, foi observado que quase dois ciclos de dados pós-falta são necessários para obter a mesma estimativa.

JOHNS & JAMALLI (1990) descreveram uma precisa técnica de localização de faltas para linhas de transmissão, na qual envolve monitoramento e filtragem das ondas de tensões e correntes medidas em ambos terminais da linha, de maneira a produzir uma medida dos fasores de tensão e corrente fundamentais em regime permanente. Eles usaram as eq.(2.21 e 2.22) para uma avaliação exata da distância à falta, calculando-a pela teoria de modos naturais e teoria de função matricial. A expressão final para o cálculo da distância de falta para o modelo de uma única fase é dada pela eq.(2.27):

$$d = \text{Arc tanh}(-B / A) / \gamma \quad (2.27)$$

Onde :

$$A = Z_0 \cosh(\gamma L_{LIN}) I_Q - \sinh(\gamma L_{LIN}) V_Q + Z_0 I_P \quad (2.28)$$

$$B = \cosh(\gamma L_{LIN}) V_Q - Z_0 \sinh(\gamma L_{LIN}) I_Q - V_P \quad (2.29)$$

A localização da falta independe da resistência de falta e não exige qualquer conhecimento da impedância da fonte. O método mantém um alto grau de precisão para linhas não transpostas e nenhuma identificação do tipo da falta é exigida. Em todos os casos testados, o erro produzido pelo algoritmo foi satisfatório.

SACHDEV & AGGARWAL (1985) propuseram uma técnica de localização de faltas não iterativa que é adequada para estimar localizações de faltas para terra. O método faz uso da impedância aparente local da linha, da corrente de sequência positiva medida, localmente, por relés e também, de dados correspondentes ao terminal remoto. A partir dessas informações, diferentes tipos de faltas foram analisados e testados usando a teoria de componentes simétricos, a fim de obter a distância da falta para cada caso. Impedâncias das fontes, fatores de distribuição e correntes pré-falta não foram usados no processo de estimação.

A técnica foi testada para dados simulados de faltas fase-terra e fase-fase-terra. Os resultados indicaram que os erros de estimação são menores que 5 % do comprimento da linha, exceto para uma porção da linha próxima do seu ponto médio, onde as contribuições das correntes de faltas dos dois terminais da linha são iguais. As medidas realizadas nos dois terminais não necessitam ser sincronizadas. O efeito da capacitância em paralelo é desprezado.

COOK (1986) apresentou duas técnicas de localização de faltas, nas quais fornece uma precisa localização da falta quando um canal de comunicação está disponível, de modo a utilizar informações disponíveis em ambos terminais, local e remoto. O primeiro método requer apenas a impedância medida em cada terminal da linha, e gera uma equação quadrática envolvendo a desconhecida distância para falta.

O segundo método necessita de duas impedâncias e duas correntes dos relés, sendo similar ao método proposto por SACHDEV & AGGARWAL (1985).

Esses métodos são, de uma maneira geral, precisos, mas não fornecem resultados satisfatórios no caso de faltas envolvendo a terra em certas localizações. O efeito da capacitância em paralelo da linha é desprezado e o algoritmo pode ser usado eficientemente para linhas transpostas, desde que os componentes sequenciais sejam usados.

GIRGIS & FALLON (1992b) desenvolveram dois métodos de localização de faltas utilizando dados obtidos por registradores digitais de faltas. O primeiro método utiliza dados de apenas um terminal da linha. Sua teoria é baseada no cálculo da impedância aparente, com inclusão das cargas dos *taps* intermediários e das impedâncias em seções diferentes da linha, para aumentar a precisão. O segundo método utiliza dados de dois terminais e faz uso dos vetores trifásicos de tensão e corrente, gerando um sistema de equações à uma incógnita. O sistema é resolvido através de um processo de solução iterativo. Esse método independe do tipo da falta e não é afetado pela resistência de falta.

2.3 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA LINHAS DE TRÊS TERMINAIS

Linhas de transmissão com três terminais, embora atrativas pelo ponto de vista econômico e ambiental, possuem problemas adicionais e por essa razão exigem uma atenção especial. Uma das maiores dificuldades são causadas por uma alimentação intermediária proveniente de um terceiro terminal alimentador. Publicações enfrentando o problema de localização de faltas em tais linhas não são muito numerosas.

AGGARWAL et al. (1993) apresentaram um método para computar a localização das faltas nas linhas de transmissão de três terminais, o qual tem sido desenvolvido, especificamente para uma linha de dois terminais por JOHNS & JAMALI (1990). A técnica é baseada na utilização das formas de ondas de tensão e corrente em todos os terminais de uma típica linha de três terminais de EAT, onde são, então, filtradas usando a técnica TDF a fim de obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime permanente. Ela faz uso de superposição, componentes modais de tensão e corrente, ao invés de valores totais e valores de fase para calcular a distância da falta. Alguns artifícios são também desenvolvidos, para efetivamente, sincronizar os dados provenientes dos três terminais e identificar exatamente o ramo faltoso, ambos requisitos necessários para encontrar um alto grau de exatidão. A

técnica é também virtualmente independente da resistência de falta e amplamente insensível à variações na impedância da fonte, configurações de linha incluindo uma linha não transposta. O método em questão apresenta uma boa precisão para as condições estudadas.

A técnica proposta por IBE & CORY (1986) e (1987), para linhas de dois terminais, baseada nos princípios das ondas viajantes, também é empregada para determinar a localização de faltas em linhas de três terminais. Para linhas de dois terminais, dados amostrados somente no terminal local são suficientes para localizar a falta. No entanto, para as linhas de três terminais, um registro adicional em qualquer um dos terminais remotos pode ser necessário para confirmar o ramo faltoso. Uma localização precisa entre 0,07 e 3,2 % é encontrada para um sistema de 33 kV.

Mesmo considerando o fato de que uma razoável precisão é atingida usando o algoritmo proposto, problemas podem ser apresentados na implementação prática. Dificuldades são muitas vezes encontradas quando se utilizam os métodos de ondas viajantes, particularmente com TP_s convencionais. Eles são, geralmente, incapazes de passar os fenômenos de alta frequência, especialmente para faltas próximas aos terminais registradores, devido a banda de passagem do transdutor ser muito limitada.

Capítulo 3

Um Algoritmo para Localização de Faltas em Linhas com Três Terminais

Neste capítulo apresenta-se um algoritmo para localizar faltas nas linhas de transmissão com três terminais.

3.1 INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão com três terminais, como mencionadas anteriormente, embora atrativas do ponto de vista econômico e ambiental, possuem problemas adicionais causados por uma alimentação intermediária, proveniente de um terceiro terminal alimentador, e por essa razão exigem uma atenção especial.

Esse capítulo apresenta um algoritmo para calcular a localização das faltas em linhas de transmissão de múltiplos terminais. O método é baseado na utilização das formas de ondas de tensão e corrente em todos os terminais da linha de transmissão, as quais são obtidas e comunicadas para um terminal de referência, onde são, então, filtradas usando-se a técnica da TDF, a fim de se obter uma medida dos seus fasores em regime permanente. O método é independente do tipo da falta e insensível às variações da impedância da fonte e a resistência de falta e também despreza a capacitância *shunt* da linha.

3.2 O ALGORÍTMO LOCALIZADOR DE FALTAS

A Fig. 3.1 exibe um diagrama de blocos esquemáticos do algoritmo localizador de faltas, o qual envolve diferentes estágios. O estágio inicial é a obtenção dos dados digitalizados de tensão e corrente nos três terminais da linha durante a ocorrência da falta. A Fig. 3.2 mostra formas de ondas típicas de tensão e corrente digitalizadas para um sistema faltoso, incluindo dados de pré-falta, vistos pelo terminal de referência P.

FIGURA 3.1 - Diagrama esquemático do algoritmo localizador de faltas

Como pode ser observado na Fig.3.1, os estágios seguintes empregados para a determinação da posição da falta são: detecção da falta, sincronização dos dados, extração dos fasores fundamentais, classificação da falta e, por último, o cálculo da distância da falta, incluindo a identificação do ramo faltoso. Esses estágios serão descritos detalhadamente a seguir.

FIGURA 3.2 - Típicas formas de ondas de tensão e corrente pós-falta digitalizadas para um sistema faltoso, incluindo dados de pré-falta, vistas pelo terminal P (falta fase terra (AT) distante 60 km de P, resistência de falta 5Ω e ângulo de incidência 90°).

3.2.1 DETECÇÃO DA FALTA

O método utiliza somente as amostras de tensão e corrente pós-falta para determinar a posição da falta. Assim, torna-se necessário determinar o ponto amostral onde a ocorrência da falta teve início, de modo a se obter o conjunto de dados formado pelo ciclo de pós-falta.

Para isso, deve-se observar a distorção das formas de ondas de tensão e corrente provocadas pela ocorrência de uma situação de falta. Essa variação é constatada pela magnitude e/ou ângulos de fase, comparando-se com as condições encontradas antes da ocorrência da mesma. O método de detecção de falta compara as amostras das três fases da linha, simultaneamente, com as amostras correspondentes ao seu ciclo anterior. Uma mudança significativa nas magnitudes das amostras entre os dois casos indica o instante em que a falta ocorreu. Para uma maior segurança, espera-se uma confirmação através das próximas comparações, sendo que, as mudanças na magnitude das três amostras seguintes determinarão o ponto exato de ocorrência da falta.

3.2.2 SINCRONIZAÇÃO DOS DADOS PROVENIENTES DOS TRÊS TERMINAIS

O algoritmo de localização de falta utiliza dados registrados independentemente nos três terminais da linha de transmissão. Em alguns casos não é possível evitar erros de cálculo devido, por exemplo, ao não sincronismo dos *clocks* nos equipamentos registradores em cada terminal da linha. Uma consequência direta desta não sincronização é que as quantidades fasoriais não possuem uma referência de tempo comum. Neste aspecto, deve ser mencionado que, na prática, se um dos terminais é designado como referência, então, o desequilíbrio (não sincronismo) dos dados registrados em qualquer um dos outros dois terminais, raramente excede duas ou três amostras quando comparadas com os dados do terminal referência. A técnica não é projetada para tolerar estes níveis de não sincronização com um aceitável grau de precisão. Assim, é de grande importância incorporar uma técnica de sincronização

dos dados para que o algoritmo continue mantendo um alto grau de precisão, particularmente em situações anormais, quando existe um desequilíbrio (não sincronismo) excepcional nos dados devido, a um disparo não simultâneo dos registradores de falta em um dos três terminais da linha, no instante da incisão da falta, por exemplo. Uma maneira de sincronizar os dados pode ser obtida através de canais de comunicação contínuos entre os terminais. Contudo, uma solução mais fácil e barata é fazer o uso dos dados de pré falta de tensão e corrente disponíveis nos terminais da linha, obtidos através dos registradores de falta (COURY, 1992). A técnica de sincronização é descrita a seguir.

3.2.2.1 A TÉCNICA DE SINCRONIZAÇÃO DO DADOS

A técnica empregada analisa a tensão no ponto T, utilizando fasores de tensão e corrente pré-falta em regime permanente obtidos através do uso da técnica TDF (descrita na seção 3.2.3). Com referência no diagrama unifilar mostrado na Fig. 3.4-a, as relações de tensões obtidas no ponto T, em função dos fasores de tensão e corrente trifásicos nos três terminais da linha, são dadas por:

$$VTP_{a,b,c} = \cosh(\gamma L_{PT}) \times VP_{a,b,c} - Z_0 \sinh(\gamma L_{PT}) \times IP_{a,b,c} \quad (3.1)$$

$$VTQ_{a,b,c} = \cosh(\gamma L_{QT}) \times VQ_{a,b,c} - Z_0 \sinh(\gamma L_{QT}) \times IQ_{a,b,c} \quad (3.2)$$

$$VTR_{a,b,c} = \cosh(\gamma L_{RT}) \times VR_{a,b,c} - Z_0 \sinh(\gamma L_{RT}) \times IR_{a,b,c} \quad (3.3)$$

No modelo pré-falta, o sistema é balanceado e pode ser representado por qualquer uma das três fases. Tomando-se a fase A como referência, VT_a pode ser calculada pelas seguintes equações:

$$VTP_a = \cosh(\gamma L_{PT}) \times VP_a - Z_0 \sinh(\gamma L_{PT}) \times IP_a \quad (3.4)$$

$$VTQ_a = \cosh(\gamma L_{QT}) \times VQ_a - Z_0 \sinh(\gamma L_{QT}) \times IQ_a \quad (3.5)$$

$$VTR_a = \cosh(\gamma L_{RT}) \times VR_a - Z_0 \sinh(\gamma L_{RT}) \times IR_a \quad (3.6)$$

Os fasores obtidos são:

$$VTP_a = \angle \theta_{TP} \quad (3.7)$$

$$VTQ_a = \angle \theta_{TQ} \quad (3.8)$$

$$VTR_a = \angle \theta_{TR} \quad (3.9)$$

É óbvio que se os dados estão sincronizados, então $VTP = VTQ = VTR$ e $\theta_{TP} = \theta_{TQ} = \theta_{TR}$ e nenhuma ação deve ser tomada. No caso de existir um desequilíbrio (não sincronismo) em qualquer um dos dois terminais em relação ao terminal referência, a magnitude dos fasores de tensão obtidos através das eq.(3.4, 3.5 e 3.6) serão idênticas, e os ângulos de fase serão diferentes. Então, para resolver esse problema deve-se ignorar um número apropriado de amostras de tensão e corrente (baseado na diferença dos ângulos de fase de $\theta_{TP}, \theta_{TQ}, \theta_{TR}$) do(s) terminal(ais) não sincronizado(s) até que os erros, devido as amostras não sincronizadas nos três terminais, sejam minimizados.

3.2.3 EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS

No sentido de atingir um alto grau de precisão na localização da falta, é de vital importância extrair precisamente os fasores fundamentais de tensão e corrente provenientes das formas de ondas de pós-falta, as quais podem conter significantes transitórios, variando desde altas frequências até níveis CC. Nesse aspecto, embora na prática os transitórios das ondas dos sistemas primários sejam atenuados por transdutores e filtros passa-baixa, as formas de ondas registradas por registradores de falta podem ainda conter componentes transitórios significativos antes de serem processadas pelo algoritmo localizador de falta, devendo-se empregar técnicas de filtragem digital para rejeitá-los.

O método empregado aqui é baseado nas informações de um ciclo dos sinais considerados, utilizando-se a TDF, a qual fornece a magnitude e o ângulo de fase do

fasor fundamental $X_{v,i}(\omega)$, sendo a equação geral dada pela eq.(3.10), conforme apresentada por BURRUS & PARKS (1985).

$$X_{v,i}(\omega) = (2 / N) \sum_{n=0}^{n=N-1} [X_{v,i}(n) \{ \cos(\omega n \Delta T) - j \sin(\omega n \Delta T) \}] \quad (3.10)$$

onde:

N = número de amostras por ciclo;

ΔT = intervalo de tempo entre amostras;

ω = frequência angular em Hz do fasor a ser extraído e

$X_{v,i}(n)$ = ondas de tensão e corrente amostradas.

A Fig. 3.3 mostra a resposta em frequência do filtro TDF utilizado. Uma série de extensivos estudos realizados mostraram que a técnica TDF, anteriormente mencionada, apresenta eficiência na rejeição dos componentes de alta frequência e, providencia uma boa filtragem dos componentes de baixa frequência.

FIGURA 3.3 - Resposta em frequência do filtro TDF utilizado

3.2.4 CLASSIFICAÇÃO DA FALTA

A classificação da falta não é um requisito essencial para o processo do cálculo da distância. Contudo, pode ser incorporada no algoritmo de localização de falta como um dispositivo opcional que permite facilitar a restauração e manutenção da linha, pela identificação do tipo da falta e da(s) fase(s) faltosa(s) envolvida(s).

A técnica utiliza componentes superpostos de tensão e corrente ao invés de valores totais para classificar a falta. Ela realiza uma comparação entre os fasores de corrente superpostos e de sequência zero fundamental I_a'' , I_b'' , I_c'' e I_0'' do terminal local P, e é descrita a seguir, conforme apresentada por COURY (1987).

Se	Falta tipo
i)	
• $I_b'' < K I_a''$ e $I_c'' < K I_a''$	Falta AT
• $I_a'' < K I_b''$ e $I_c'' < K I_b''$	Falta BT
• $I_a'' < K I_c''$ e $I_b'' < K I_c''$	Falta CT
ii)	
• $I_c'' < K I_a''$ e $I_b'' \cong I_a''$ e - $I_0'' > I_{\min}''$	Falta ABT
- caso contrário	Falta AB
• $I_a'' < K I_b''$ e $I_c'' \cong I_b''$ e - $I_0'' > I_{\min}''$	Falta BCT
- caso contrário	Falta BC
• $I_b'' < K I_a''$ e $I_a'' \cong I_c''$ e - $I_0'' > I_{\min}''$	Falta ACT
- caso contrário	Falta AC
iii)	
• $I_a'' \cong I_b'' \cong I_c''$	Falta ABC

O parâmetro K é razão entre as correntes de fase sã e faltosa e depende da configuração do sistema. Uma série de estudos mostraram que, para o sistema em questão, $K = 0,1$ fornece uma correta classificação da falta para todos os tipos de falta.

Na prática é necessário também aplicar um pequeno *threshold* $I_{\min}$ para as medidas, devido à existência de linhas não balanceadas, transdutores e erros na filtragem, etc.

O critério é aplicado para todos os três terminais P, Q e R e em cada caso estudado, pelo menos um terminal contém informação suficiente para a técnica classificar corretamente o tipo da falta.

3.2.5 TEORIA FUNDAMENTAL E EQUACIONAMENTO DA TÉCNICA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Esta seção descreve os princípios da técnica de localização de faltas, que utiliza fasores de tensão e corrente trifásicos dos três terminais da linha para calcular a localização da falta. A técnica supõe que todas as impedâncias da linha por unidade de comprimento são as mesmas, para identificar o ramo faltoso.

O equacionamento realizado considera o terminal P como sendo o terminal de referência local, e assume uma falta (F_1) ocorrendo no ramo L_{PT} (Fig. 3.4-b). O algoritmo utiliza somente as impedâncias série da linha, desprezando a capacitância *shunt* da mesma.

3.2.5.1 CÁLCULO DA DISTÂNCIA DA FALTA E IDENTIFICAÇÃO DO RAMO FALTOSO PARA LINHAS DE TRÊS TERMINAIS

O modelo de uma linha de três terminais em regime permanente de pré-falta é mostrada na Fig. 3.4-a, e as diferentes condições de faltas consideradas são mostradas na Fig. 3.4-b, 3.4-c e 3.4-d, onde $ZPT_{a,b,c}$, $ZQT_{a,b,c}$ e $ZRT_{a,b,c}$ representam a matriz de impedância série dos ramos da linha L_{PT} , L_{QT} e L_{RT} , respectivamente e $VF_{a,b,c}$ é o vetor de tensão na falta.

Para uma falta (F_1) no ramo L_{PT} (Fig. 3.4-b), as tensões trifásicas nos terminais P, Q e R podem ser expressas em termos das correntes trifásicas como seguem (GIRGIS et al. 1992a):

$$VP_{a,b,c} = VF_{a,b,c} + ZPT_{a,b,c} IP_{a,b,c} d \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} VQ_{a,b,c} = & VF_{a,b,c} + L_{QT} ZQT_{a,b,c} IQ_{a,b,c} \\ & + (L_{PT} - d) ZPT_{a,b,c} (IQ_{a,b,c} + IR_{a,b,c}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} VR_{a,b,c} = & VF_{a,b,c} + L_{RT} ZRT_{a,b,c} IR_{a,b,c} \\ & + (L_{PT} - d) ZPT_{a,b,c} (IQ_{a,b,c} + IR_{a,b,c}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Eliminando-se a tensão de falta ($VF_{a,b,c}$) na posição da falta, das eq.(3.11 e 3.12) obtêm-se:

$$\begin{aligned} d \times ZPT_{a,b,c} (IP_{a,b,c} + IQ_{a,b,c} + IR_{a,b,c}) = & VP_{a,b,c} - VQ_{a,b,c} \\ & + (L_{PT} ZPT_{a,b,c} + L_{QT} ZQT_{a,b,c}) IQ_{a,b,c} \\ & + L_{PT} ZPT_{a,b,c} IR_{a,b,c} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Similarmente, usando as eq.(3.11 e 3.13) obtêm-se:

$$\begin{aligned} d' \times ZPT_{a,b,c} (IP_{a,b,c} + IQ_{a,b,c} + IR_{a,b,c}) = & VP_{a,b,c} - VR_{a,b,c} \\ & + (L_{PT} ZPT_{a,b,c} + L_{RT} ZTR_{a,b,c}) IR_{a,b,c} \\ & + L_{PT} ZPT_{a,b,c} IQ_{a,b,c} \end{aligned} \quad (3.15)$$

A eq.(3.14) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \times d = \begin{bmatrix} YPQ_a \\ YPQ_b \\ YPQ_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde:

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} (IP_k + IQ_k + IR_k) ZPT_{jk}$$

$$\begin{aligned} YPQ_j &= VP_j - VQ_j \\ &+ \sum_{k=a,b,c} (L_{PT} ZPT_{jk} + L_{QT} ZQT_{jk}) IQ_k \\ &+ L_{PT} \sum_{k=a,b,c} ZPT_{jk} IR_k \end{aligned}$$

e

$$j = a, b, c$$

Similarmente, a eq.(3.15) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \times d' = \begin{bmatrix} YPR_a \\ YPR_b \\ YPR_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

onde:

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} (IP_k + IQ_k + IR_k) ZPT_{jk}$$

$$\begin{aligned} YPR_j &= VP_j - VR_j \\ &+ \sum_{k=a,b,c} (L_{PT} ZPT_{jk} + L_{RT} ZRT_{jk}) IR_k \\ &+ L_{PT} \sum_{k=a,b,c} ZPT_{jk} IQ_k \end{aligned}$$

e

$$j = a, b, c$$

As eq.(3.16 e 3.17) representam três equações complexas e uma incógnita (real), ou seis equações reais e uma incógnita. A solução para $\mathbf{d}$ pode, então, ser obtida a partir da eq.(3.16) como:

$$\mathbf{d} = (\mathbf{M}^+ \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^+ \mathbf{Y} \mathbf{P} \mathbf{Q} \quad (3.18)$$

Uma outra solução também pode ser obtida usando a eq.(3.17):

$$\mathbf{d}' = (\mathbf{M}^+ \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^+ \mathbf{Y} \mathbf{P} \mathbf{R} \quad (3.19)$$

Onde $\mathbf{M}^+$ é o conjugado transposto de $\mathbf{M}$.

Para uma falta (F_2) no ramo L_{QT} (Fig. 3.4-c), supondo que as impedâncias da linha por unidade de comprimento são as mesmas, pode ser mostrado que a eq.(3.16) ainda se mantém. Contudo, a eq.(3.17) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_a \\ \mathbf{M}_b \\ \mathbf{M}_c \end{bmatrix} \times \mathbf{L}_{PT} = \begin{bmatrix} \mathbf{YPR}_a \\ \mathbf{YPR}_b \\ \mathbf{YPR}_c \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Onde: $\mathbf{d}' = \mathbf{L}_{PT}$

Similarmente, para uma falta (F_3) no ramo L_{RT} (Fig. 3.4-d), supondo que as impedâncias da linha por unidade de comprimento são as mesmas, a eq.(3.17) ainda se mantém, mas a eq.(3.16) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_a \\ \mathbf{M}_b \\ \mathbf{M}_c \end{bmatrix} \times \mathbf{L}_{PT} = \begin{bmatrix} \mathbf{YPQ}_a \\ \mathbf{YPQ}_b \\ \mathbf{YPQ}_c \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Onde: $\mathbf{d} = \mathbf{L}_{PT}$

Assim pode ser facilmente mostrado que, para mesmas impedâncias de linha por unidade de comprimento, as eq.(3.18 e 3.19) levam as seguintes soluções:

- (i) Se a falta (F_1) está no ramo L_{PT} (Fig. 3.4-b), então:

$$d < L_{PT} \quad \text{e} \quad d' < L_{PT}$$

- (ii) Se a falta (F_2) está no ramo L_{QT} (Fig. 3.4-c), então:

$$d > L_{PT} \quad \text{e} \quad d' = L_{PT}$$

- (iii) Se a falta (F_3) está no ramo L_{RT} (Fig. 3.4-d), então:

$$d = L_{PT} \quad \text{e} \quad d' > L_{PT}$$

Salienta-se que somente as eq.(3.18 e 3.19) precisam ser resolvidas independentemente para uma falta no ramo L_{PT} ou L_{QT} ou L_{RT} .

FIGURA 3.4-a - Modelo de uma linha de três terminais em regime permanente de pré-falta

FIGURA 3.4-b - Modelo de uma linha de três terminais em situação faltosa no ramo L_{PT}

FIGURA 3.4-c - Modelo de uma linha de três terminais em situação faltosa no ramo L_{QT}

FIGURA 3.4-d - Modelo de uma linha de três terminais em situação
faltosa no ramo L_{RT}

Capítulo 4

Simulações no Sistema Elétrico de Potência Através do *Software* ATP

Neste capítulo apresenta-se as características do Sistema Elétrico de Potência implementado, bem como o *software* ATP utilizado para as simulações.

4.1 INTRODUÇÃO

Para verificar a aplicação do método proposto, um modelo de linha de transmissão de três terminais foi utilizado e submetido à condições faltosas para realização de uma série de simulações computacionais, as quais fornecem informações precisas sobre o comportamento dos sinais de tensão e corrente, na ocorrência da falta no sistema. Estas informações são essenciais para os testes da técnica de localização de faltas em questão.

O algoritmo foi testado utilizando valores amostrais de tensão e corrente obtidos através de simulações do *software* ATP, para uma variedade de condições, aplicando-se diversas localizações, resistências, ângulos de incidência e diferentes tipos de faltas, a fim de cobrir as diversas situações comuns a uma linha de EAT. Os resultados obtidos pelo algoritmo são apresentados no capítulo seguinte, de acordo com os estágios envolvidos no algoritmo de localização descrito no capítulo 3.

4.2 GERADOR DE DADOS - *ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM* (ATP)

O ATP é um programa que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução, são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes. Como o programa não permite obter uma solução contínua no tempo, são calculados valores a intervalos de tempo discretos. O programa permite a representação de não linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, etc. De uma forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em sequência zero e positiva, dependendo do modelo (AMON FILHO & PEREIRA, 1994). O ATP é uma continuação das versões anteriores do programa *Eletromagnetic Transients Program* (EMTP) e toda sua documentação consiste basicamente de um manual *Alternative Transients Program - Rule Book* (1987), onde estão todas informações sobre os modelos disponíveis.

4.2.1 DESTRO - *INTERFACE* GRÁFICA DO ATP

Destro é uma *interface* gráfica que gera o arquivo de entrada de dados do ATP a partir de circuitos elétricos desenhados na tela. A maior vantagem do destro é a sua simplicidade em permitir que um usuário que não conheça o ATP possa gerar o seu arquivo de dados sem precisar aprender os seus códigos. Com esta nova *interface* gráfica, somente é preciso saber o que se deseja simular, gerar o circuito através da escolha dos símbolos e depois fornecer os dados. O programa irá apresentar uma janela de dados simples com todas as informações necessárias e irá guiar, o usuário, de modo a não omitir nenhum dado, (TAVARES, 1994).

4.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP)

A configuração básica do SEP analisado, com especificação das fontes, barramentos e comprimentos das linhas é o da Fig. 4.1, que corresponde a uma linha de transmissão de três terminais de 400 kV, 150 km interligando os terminais PT, 80 km interligando os terminais QT e 100 km interligando os terminais RT.

A configuração do SEP é assimétrica devido ao fato de possuir fontes de capacidades diferentes, e também, comprimentos de linha até o terminal T desiguais.

FIGURA 4.1 - Configuração do Sistema Elétrico de Potência

4.3.1 CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DA LINHA DE TRANSMISSÃO

A configuração geométrica da linha de transmissão (perfil da torre utilizada como sustentação dos cabos de transmissão de energia elétrica e dos cabos de proteção contra descargas atmosféricas) é mostrada na Fig. 4.2, ilustrando a disposição dos condutores no espaço.

FIGURA 4.2 - Configuração geométrica da linha de transmissão

O sistema consiste em uma linha trifásica com dois condutores por fase. Abaixo apresenta-se, as especificações referentes aos condutores empregados, denotando-se as suas principais características, bem como a resistividade do solo considerada.

Condutores de Fase

Tipo do condutor: Bluejay 45x7 - ACSR;

Relação entre a espessura do diâmetro externo do condutor (T/D): 0,231;

Diâmetro interno do condutor: 7,98 mm;

Diâmetro externo do condutor: 31,98 mm;

Resistência em corrente contínua: 0,051370 Ω /km.

Cabos pára-raios

Tipo do condutor: Guinéa 12x7 - ACSR;

Relação entre a espessura do diâmetro externo do condutor (T/D): 0,5;

Diâmetro externo do condutor: 14,6 mm;

Resistência em corrente contínua: 0,35961 Ω/km .

Resistividade do solo

R_{SOLO} : 250 Ω/km

4.3.2 PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Para a simulação de linhas de transmissão longas, a melhor representação que se pode obter para o sistema é, utilizar cálculos com parâmetros de resistência, indutância e capacitância distribuídos ao longo da linha, uma vez que essa situação fornece a melhor solução para os cálculos do sistema em análise. No cálculo de parâmetros distribuídos, a linha de transmissão é considerada como uma associação de resistências e indutâncias série e capacitâncias em derivação por unidade de comprimento ligadas conforme o esquema da Fig. 4.3.

FIGURA 4.3 - Representação por parâmetros distribuídos de uma seção da linha de transmissão

Para a obtenção dos parâmetros de linha de transmissão, os cálculos são efetuados independentemente da frequência da rede, uma vez que esses parâmetros são considerados constantes em relação à mesma. Esta suposição não é absolutamente correta, pois sabe-se que tanto a resistência, como a indutância, variam com a frequência devido ao efeito pelicular (MEYER & DOMMEL, 1974). Os parâmetros dependentes da frequência são importantes quando os efeitos de alta frequência são objetivo de estudo, o que não se refere ao caso analisado. Também, nos cálculos considera-se que as linhas de transmissão são transpostas, compensando os desequilíbrios dos campos magnéticos entre as fases, cabos pára-raios, estruturas e o solo sob a linha de transmissão. Os parâmetros distribuídos e constantes R , L e C , vistos na da Fig. 4.3, são resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento e serão determinados através da rotina do *software* ATP chamada *Line Constants*, que será apresentada a seguir.

4.3.3 ROTINA *LINE CONSTANTS*

A rotina *Line Constants* calcula os parâmetros da linha de transmissão para uma determinada frequência a partir das características dos condutores, cabos pára-raios, resistividade do solo e configuração geométrica da torre. Os valores gerados, são valores de sequência zero e positiva das grandezas referentes às resistências, reatâncias e susceptâncias, considerando a linha de transmissão com transposição. Na Fig. 4.4 é listado o arquivo de entrada da rotina *Line Constants* que possui informações da configuração geométrica da linha, resistividade do solo, condições da linha (com ou sem transposição), frequência em que os parâmetros são calculados, número de condutores por fase, etc. Os resultados obtidos após o processamento da rotina *Line Constants*, são devidamente inseridos no arquivo de entrada de dados de simulação dos transitórios do sistema elétrico, que será descrito a seguir.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C   LINE CONSTANT           com transposição

C   Test of for 150-km, single-circuit, 400-kV overhead
C   line that connects "Rio Maior" with "Cedillo" (Portugal substations).
C   There are 2 ground wires (both eliminated), and each phase consists of a
C   bundle of 2 conductors.
C
C   parametros calculados para 600 Hz
```

```

LINE CONSTANTS
METRIC
BRANCH PA BUSTA PB BUSTB PC BUSTC
C 1 2 3 4 5
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 .231 .05137 4 3.198 -12.2 21.63 9.83
1 .231 .05137 4 3.198 -11.8 21.63 9.83
2 .231 .05137 4 3.198 -0.2 21.63 9.83
2 .231 .05137 4 3.198 0.2 21.63 9.83
3 .231 .05137 4 3.198 11.8 21.63 9.83
3 .231 .05137 4 3.198 12.2 21.63 9.83
0 .5 .35961 4 1.46 -8.05 30.5 23.2
0 .5 .35961 4 1.46 -7.65 30.5 23.2
0 .5 .35961 4 1.46 7.65 30.5 23.2
0 .5 .35961 4 1.46 8.05 30.5 23.2
BLANK card ending conductor cards within "LINE CONSTANTS" data
C 1 2 3 4 5 6 7
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
250. 600.0 11 11 1 150. 0
C 250. 6.0 150. 5 30
BLANK card ending frequency cards of "LINE CONSTANTS" data
BLANK card ending "LINE CONSTANTS" data cases
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

FIGURA 4.4- Arquivo de entrada de dados da rotina *Line Contants*

4.3.4 ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS DO ATP

O arquivo de entrada de dados do ATP é composto por um conjunto de informações, agrupadas por classes e dispostas em determinada ordem. A Fig. 4.5 mostra o arquivo de entrada de dados para uma falta fase-terra referente ao sistema elétrico analisado, contento cartões de informações gerais (passo de integração, tempo máximo de simulação, frequência de saída de resultados, etc.), cartão para ramos lineares (indutâncias, capacitâncias, resistências, linha de transmissão, etc), cartões para chaves, cartões para fontes e cartões para pedido das tensões nas barras.

```

BEGIN NEW DATA CASE
2.0000-5.0500000
1 1 1 1 1 1
$DISABLE
ELENILTON - (FASE-TERRA)
$ENABLE
$VINTAGE, 1
FPTA 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FPTB 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FPTC 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FTQA 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FTQB 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FTQC 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FTRA 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FTRB 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
FTRC 1.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
-1P1A 166A 5.08621E-01 2.02914E+00 8.33300E-03 7.50000E+01 0 00
-2P1B 166B 4.69600E-02 1.05245E+00 1.10310E-02 7.50000E+01 0 00
-3P1C 166C
-1166A T0A 5.08621E-01 2.02914E+00 8.33300E-03 7.50000E+01 0 00
-2166B T0B 4.69600E-02 1.05245E+00 1.10310E-02 7.50000E+01 0 00
-3166C T0C

```



```

-1T1A 90A 5.08621E-01 2.02914E+00 8.33300E-03 4.00000E+01 0 00
-2T1B 90B 4.69600E-02 1.05245E+00 1.10310E-02 4.00000E+01 0 00
-3T1C 90C
-190A Q1A 5.08621E-01 2.02914E+00 8.33300E-03 4.00000E+01 0 00
-290B Q1B 4.69600E-02 1.05245E+00 1.10310E-02 4.00000E+01 0 00
-390C Q1C
-1T2A 210A 5.08621E-01 2.02914E+00 8.33300E-03 5.00000E+01 0 00
-2T2B 210B 4.69600E-02 1.05245E+00 1.10310E-02 5.00000E+01 0 00
-3T2C 210C
-1210A R1A 5.08620E-01 2.02914E+00 8.33300E-03 5.00000E+01 0 00
-2210B R1B 4.69600E-02 1.05245E+00 1.10310E-02 5.00000E+01 0 00
-3210C R1C
$VINTAGE, 0
51Q1A GERQA .35351 1.06901E+01
52Q1B GERQB 1.5595 4.71570E+01
53Q1C GERQC
$VINTAGE, 1
$VINTAGE, 0
51GERPA PA .31816 9.62105E+00
52GERPB PB 1.4035 4.24413E+01
53GERPC PC
$VINTAGE, 1
$VINTAGE, 0
51R1A GERRA .33491 1.01274E+01
52R1B GERRB 1.4774 4.46751E+01
53R1C GERRC
$VINTAGE, 1
$VINTAGE, 0
BLANK card terminating network
PA P1A MEASURING 1
PB P1B MEASURING 1
PC P1C MEASURING 1
QA Q1A MEASURING 1
QB Q1B MEASURING 1
QC Q1C MEASURING 1
RA R1A MEASURING 1
RB R1B MEASURING 1
RC R1C MEASURING 1
TA T0A MEASURING 0
TB T0B MEASURING 0
TC T0C MEASURING 0
TA T1A MEASURING 0
TB T1B MEASURING 0
TC T1C MEASURING 0
TA T2A MEASURING 0
TB T2B MEASURING 0
TC T2C MEASURING 0
166A FPTA 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
166B FPTB 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
166C FPTC 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
90A FTQA 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
90B FTQB 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
90C FTQC 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
210A FTRA 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
210B FTRB 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
210C FTRC 1.000E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
BLANK card terminating switches
14GERPA 0 3.593E+05 6.000E+01 2.000E+01 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERPB 0 3.593E+05 6.000E+01 -1.000E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERPC 0 3.593E+05 6.000E+01 1.400E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERQA 0 3.593E+05 6.000E+01 0.000E+00 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERQB 0 3.593E+05 6.000E+01 -1.200E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERQC 0 3.593E+05 6.000E+01 1.200E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERRA 0 2.939E+05 6.000E+01 1.000E+01 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERRB 0 2.939E+05 6.000E+01 -1.100E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
14GERRC 0 2.939E+05 6.000E+01 1.300E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
BLANK card terminating sources
PA PB PC QA QB QC RA RB RC
BLANK card terminating outputs
BLANK card terminating plots
BEGIN NEW DATA CASE

```

FIGURA 4.5- Arquivo de entrada de dados do ATP para uma falta fase-terra

O esquema elétrico dos elementos modelados no ATP, composto por equivalentes de geração (fonte ideal, mais circuito RL acoplado), parâmetros distribuídos representando a linha de transmissão (resistências, indutâncias, capacitâncias), barramentos, resistências de falta, chaves, é mostrado na Fig. 4.6, onde cada ramo da linha de transmissão de três terminais foi dividido em duas partes, para que a localização da falta pudesse ser variada cobrindo toda linha.

FIGURA 4.6 - Esquema elétrico dos elementos modelados no ATP

Onde:

- $Rf_P + Lf_P$, $Rf_Q + Lf_Q$ e $Rf_R + Lf_R$ indicam os circuitos LR acoplados (resistências e indutâncias) relacionadas com os equivalentes de geração dos barramentos P, Q e R;
- LT_{PT1} e LT_{PT2} indicam as porções da linha representadas por parâmetros distribuídos e segmentadas pela barra (166), contendo a resistência de falta (R_F) no ramo L_{PT} ;
- LT_{QT1} e LT_{QT2} indicam as porções da linha representadas por parâmetros distribuídos e segmentadas pela barra (90), contendo a resistência de falta (R_F) no ramo L_{QT} ;

- L_{RT1} e L_{RT2} indicam as porções da linha representadas por parâmetros distribuídos e segmentadas pela barra (210), contendo a resistência de falta (R_F) no ramo L_{RT} ;
- L_{PT} , L_{QT} e L_{RT} indicam os comprimentos dos ramos PT, RT e QT, respectivamente;
- R_F representa a resistência de falta;
- P, Q, R e T são os barramentos tomados como referência;
- CHPT, CHQT, CHRT indicam as chaves controladas por tempo, que são fechadas quando se quer determinar a ocorrência de uma falta na linha de transmissão.
- GERP, GERQ, GERR, 166, 210, 90, FPT, FTQ, FTR, P1, Q1, R1, T0, T1 e T2 são barramentos auxiliares utilizados para conexão de elementos.

4.4 SIMULAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

De modo a testar o algoritmo localizador de faltas utilizando amostras de tensão e corrente obtidas em cada terminal da linha, foi necessário simular um conjunto de situações faltosas através do *software* ATP, variando-se o tipo da falta, a distância da falta (em relação aos terminais P, Q e R), o valor da resistência de falta e o ângulo de incidência a mesma. As simulações foram desenvolvidas de acordo com as seguintes condições:

- (a) Tipos de falta - foram simulados todos os tipos de faltas possíveis: fase-terra (AT, BT e CT), fase-fase (AB, AC e BC), fase-fase-terra (ABT, ACT e BCT), trifásico (ABC) e trifásico-terra (ABCT), das quais suas configurações podem ser vistas através da Fig. 4.7.
- (b) Localizações da falta - trinta posições de falta foram aplicadas ao longo dos ramos da linha de transmissão, as quais são mencionadas a seguir, tomando como referência os terminais P, Q, e R.
  - Ramo PT: 6, 15, 30, 45, 60, 90, 105, 120, 135 e 144 km;
  - Ramo QT: 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64 e 74 km;
  - Ramo RT: 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 94 km.

(c) Resistências de falta - foram admitidos dez valores de resistências de falta (R_F): 1, 5, 17, 25, 33, 50, 75, 100, 150 e 200 Ω .

(d) Ângulos de incidência da falta - os ângulos de ocorrência da falta foram: 0° , 45° e 90° .

(a) Falta fase-terra
(falta AT)

(b) Falta fase-fase
(falta AB)

(c) Falta fase-fase-terra
(falta ABT)

(d) Falta trifásica
(falta ABC)

(e) Falta trifásica-terra
(falta ABCT)

FIGURA 4.7 - Configurações dos tipos de faltas simulados

Capítulo 5

Apresentação dos Resultados dos Testes Realizados pelo Algoritmo Localizador de Faltas

Neste capítulo apresenta-se os resultados dos testes realizados pelo algoritmo localizador de faltas.

5.1 INTRODUÇÃO

São apresentados neste capítulo os resultados dos testes obtidos pelo algoritmo localizador de faltas, (que utilizou valores amostrais de tensão e corrente nos três terminais da linha, obtidos através de simulações do *software* ATP) para várias condições aplicadas a configuração da Fig. 4.1, de acordo com os estágios envolvidos no algoritmo localizador de faltas, descrito no capítulo 3.

Embora uma série muito extensa de testes tenha sido realizada para verificar o desempenho do algoritmo localizador de faltas, somente os resultados principais serão apresentados aqui, assim como a discussão dos mesmos.

5.2 SIMULAÇÃO DO “*HARDWARE*” DO LOCALIZADOR DE FALTA

Os resultados das simulações (valores amostrais de tensão e corrente) obtidos através do *software* ATP, foram gerados a uma frequência amostral de 50 kHz (834 amostras em um ciclo de 60 Hz), podendo conter componentes de alta frequência provocados por mudanças bruscas nas formas de ondas na ocorrência da falta. Devido aos componentes de alta frequência e a alta taxa amostral, foi necessário implementar dois estágios (filtragem dos dados e reamostragem) para simular o *hardware* do localizador, e desta forma adequar os dados simulados aos encontrados na prática, para serem utilizados nos testes do algoritmo. Os estágios implementados são descritos a seguir.

5.2.1 FILTRAGEM DOS DADOS

Após os dados serem gerados, provenientes das simulações de situações faltosas do sistema elétrico analisado, o primeiro passo foi a filtragem analógica dos sinais amostrados, com a finalidade de reduzir os componentes de alta frequência, evitando-se a sobreposição de espectros (efeito *aliasing*), conforme apresentado por PHADKE (1988). Essa filtragem é realizada por um filtro digital passa-baixa Butterworth, na qual simula um filtro analógico real passa-baixa. Algumas características desse filtro são mencionadas a seguir.

5.2.1.1 FILTRO PASSA-BAIXA BUTTERWORTH

Somente filtros do tipo passa-baixa são utilizados como filtros *anti-aliasing* na conversão A/D dos sinais. A Fig. 5.1 mostra a curva da amplitude de um filtro passa-baixa ideal, na qual permite a passagem de sinais de baixa frequência e suprime sinais de alta frequência. O filtro passa-baixa ideal possui as seguintes características expressas pela eq.(5.1) segundo SERRA (1983):

$$\begin{aligned} |H(jw)| &= 1 & \text{para } 0 < w < w_c \\ |H(jw)| &= 0 & \text{para } w > w_c \end{aligned} \tag{5.1}$$

FIGURA 5.1 - Curva da amplitude de um filtro passa-baixa ideal

Na prática, um filtro real deveria possuir uma delimitação bem definida entre a banda de passagem e a banda de rejeição. No entanto, isso não ocorre devido à curva da amplitude, versus frequência, não possuir pontos de demarcação bem definidos indicando os extremos da banda de passagem e de rejeição. Surge, então, uma banda de transição entre elas. Portanto, um filtro passa-baixa real é, na verdade, uma aproximação do filtro passa-baixa ideal; e, um dos filtros que mais se aproxima do ideal, é o filtro passa-baixa de Butterworth, na qual sua função de amplitude é dada pela eq.(5.2):

$$|H(jw)| = \frac{k}{\sqrt{1 + \left(\frac{w}{w_c}\right)^{2n}}} \quad (5.2)$$

Onde w_c é a frequência de corte, n é a ordem do filtro e k é o ganho. O filtro Butterworth possui as seguintes características:

- (a) Possuem uma resposta monotonicamente crescente para $w > 0$;
- (b) A amplitude da resposta em $w = 0$ é igual a k (ganho unitário);
- (c) A amplitude da resposta é maximamente plana nas bandas de passagem e de rejeição devido as primeiras $(2n - 1)$ derivadas em $w = 0$ serem nulas, o mesmo ocorrendo para w tendendo ao infinito ($w \rightarrow \infty$).

A Fig. 5.2 mostra as respostas da amplitude do filtro Butterworth para as diferentes ordens n , onde $k = 1$ e $w_c = 1$ rad/seg.

FIGURA 5.2 - Curva das respostas da amplitude do filtro Butterworth para diferentes ordens

Através da Fig. 5.2, podemos observar que quanto maior o valor do parâmetro n , mais próxima fica a resposta do filtro de Butterworth em relação ao filtro ideal, ou seja, na banda de passagem a curva se mantém próxima do valor do ganho (k) enquanto que decai mais bruscamente para próximo de zero na banda de rejeição reduzindo a banda de transição.

Outra forma de observarmos a característica de um filtro de Butterworth é através da curva da atenuação, vista através da Fig. 5.3, que é obtida a partir da eq.(5.3).

$$A(w) = 10 \times \log (|H(jw)|^2) = 10 \times \log \left[1 + \left(\frac{w}{w_c} \right)^2 \right] \text{ dB} \quad (5.3)$$

FIGURA 5.3 - Curvas de atenuação dos filtros Butterworth para diferentes ordens

As especificações dos filtros são, geralmente, determinadas de acordo com a Fig. 5.4, onde é permitida uma atenuação máxima na banda de passagem e uma atenuação mínima na banda de rejeição (HILBURN & JOHNSON, 1983).

FIGURA 5.4 - Gráfico das especificações dos filtros passa-baixa.

O filtro Butterworth projetado para simulação possui as seguintes especificações correspondentes a de um filtro analógico real:

- (a) Frequência e atenuação máxima na banda de passagem: 750 Hz e 1 dB;
- (b) Frequência e atenuação mínima na banda de atenuação: 1100 Hz e 60 dB;
- (e) Frequência de amostragem: 3840 Hz.

A partir das especificações correspondentes a de um filtro analógico, obteve-se as seguintes características do filtro passa-baixa de Butterworth, citadas abaixo:

- (a) Ordem do filtro: 14;
- (b) Frequência de corte: 920 Hz;
- (c) Coeficientes do filtro: $A_0=1,0000$, $A_1=-2,3069$, $A_2=4,2599$, $A_3=-5,0450$, $A_4=4,8801$, $A_5=-3,5983$, $A_6=2,1843$, $A_7=-1,0521$, $A_8=0,4127$, $A_9=-0,1276$, $A_{10}=0,0310$, $A_{11}=-0,0056$, $A_{12}=0,0007$, $A_{13}=-0,0001$, $A_{14}=0,0000$, $B_0=0,0000$, $B_1=0,0005$, $B_2=0,0035$, $B_3=0,0141$, $B_4=0,0387$, $B_5=0,0774$, $B_6=0,1160$, $B_7=0,1326$, $B_8=0,1160$, $B_9=0,0774$, $B_{10}=0,0387$, $B_{11}=0,0141$, $B_{12}=0,0035$, $B_{13}=0,0005$, $B_{14}=0,0000$.

A Fig. 5.5 ilustra a aplicação do filtro Butterworth através de uma onda de tensão filtrada, junto com uma onda ruidosa para uma falta fase-terra (AT) a 60 km do terminal P.

FIGURA 5.5 - Forma de onda de tensão ruidosa com sua respectiva forma de onda filtrada pelo filtro Butterworth (resistência de falta 5Ω e ângulo de incidência 90°).

5.2.2 REAMOSTRAGEM DOS DADOS

O passo seguinte após a filtragem, foi reamostrar os dados para uma frequência amostral de 3840 Hz (64 amostras em um ciclo de 60 Hz), de modo a adequar a frequência amostral (na qual os dados são gerados pelo *software* ATP) à uma frequência amostral utilizada pelo conversor A/D de um dispositivo na prática. Dessa maneira finaliza-se a simulação do *hardware* e a seguir, apresenta-se os resultados das simulações do *software* do algoritmo localizador de faltas.

5.3 TESTES REALIZADOS PELO ALGORÍTMO LOCALIZADOR DE FALTAS

Os resultados dos testes descritos a seguir foram realizados a partir de dados gerados através do *software* ATP, os quais foram filtrados através do filtro Butterworth, com o objetivo de evitar o efeito *aliasing* e reamostrados para uma frequência 3840 Hz para adequar a frequência amostral utilizada pelo conversor A/D, como mencionado anteriormente. Os resultados dos testes se referem a configuração assimétrica do sistema da Fig. 4.1 e serão apresentados, a seguir, conforme cada estágio envolvido no algoritmo localizador de faltas, descrito no capítulo 3.

5.3.1 IDENTIFICAÇÃO DO PONTO DE OCORRÊNCIA DA FALTA

A Fig. 5.6 mostra as formas de ondas de tensão e corrente pós-falta para uma falta fase-terra (AT) a 60 km do terminal P (vista pelo terminal P) para o sistema mostrado na Fig. 4.1, junto com as formas de ondas de pré-falta de um ciclo anterior a falta. Como explicitado na seção 3.2.1, a determinação do ponto de ocorrência da falta é baseada na comparação das amostras de cada fase da linha, com as amostras correspondentes a um ciclo anterior. Após a ocorrência de três amostras consecutivas com variações substanciais na magnitude e/ou ângulos de fase, verifica-se a ocorrência da falta. A Fig. 5.6 mostra claramente as variações substanciais na magnitude em relação a forma de onda de pré-falta.

FIGURA 5.6 - Formas de ondas de tensão e corrente imediatamente após a falta e um ciclo anterior à ocorrência da mesma (resistência de falta 5Ω e ângulo de incidência 90°).

Para linhas de transmissão com três terminais que utilizam dados provenientes de todos os terminais, identifica-se o ponto de ocorrência da falta em cada terminal da linha, no qual, são obtidos três conjuntos com um ciclo de dados pós-falta, e, três

conjuntos com um ciclo de dados pré-falta relativos a cada terminal. Deve ser notado também, que a identificação do ponto de ocorrência da falta independe do tipo da falta.

5.3.2 EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS DAS ONDAS DE TENSÃO E CORRENTE ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (TDF)

A TDF extrai os componentes fundamentais (60 Hz) das ondas ruidosas de tensão e corrente dos dados pós-falta. As Fig. 5.7 e 5.8 mostram as ondas ruidosas de tensão e corrente com seus respectivos componentes fundamentais, para uma falta fase-terra (AT) ocorrida no ramo L_{PT} a 60 km do terminal de referência P.

Pode ser visto através das Fig. 5.7 e 5.8 que a técnica de filtragem proposta é bastante eficiente na extração do componente fundamental proveniente dos dados de pós-falta.

FIGURA 5.7 - Formas de ondas de tensão ruidosas com suas respectivas formas ondas filtradas pela TDF para uma falta fase-terra (AT) (resistência de falta 5Ω e ângulo de incidência 90°).

FIGURA 5.8 - Formas de ondas de corrente ruidosas com suas respectivas formas ondas filtradas pela TDF para uma falta fase-terra (AT) (resistência de falta 5Ω e ângulo de incidência 90°).

5.3.3 CLASSIFICAÇÃO DA FALTA

Como mencionado na seção 3.2.4, o método para a classificação da falta é baseado na comparação entre os fasores de corrente superpostos e de sequência zero fundamental para as fases (A), (B), (C) e o componente sequência zero. A Fig. 5.9 mostra os resultados da técnica de classificação de falta para os diferentes tipos de falta aplicados a uma distância de 30 km do terminal P no ramo L_{PT} , para a configuração do sistema mostrado na Fig.4.1. Os valores dos fasores de I''_a , I''_b , I''_c e I''_0 são normalizados para a fase que possui o maior valor. Usando um fator $K = 0,1$, como descrito na seção 3.2.4, considera-se que os fasores de valor inferior 0,1 são não faltosos e os fasores de valor superior a 0,7 são faltosos. A existência ou não do componente de sequência zero, indica se a falta envolve terra. Novamente, como já mencionado, um pequeno *threshold* $I_{\min} = 0,1$ é necessário ser aplicado nas medidas, devido à existência de linhas não balanceadas, transdutores e erros na filtragem, etc. Os testes demonstraram que a técnica de classificação de falta foi capaz de classificar corretamente os tipos de faltas para todos os casos analisados.

FIGURA 5.9 - Classificação dos diversos tipos de faltas, em diferentes localizações sobre ramo L_{PT} (resistência de falta 5Ω e ângulo de incisão 0°)

5.3.4 CÁLCULO DA DISTÂNCIA DA FALTA E IDENTIFICAÇÃO DO RAMO FALTOSO

O passo final do algoritmo localizador de falta foi a aplicação da técnica de localização de faltas para linhas com três terminais para obtenção da distância em relação ao terminal de referência P, bem como a identificação do ramo faltoso. A margem de erro dos cálculos é expressa como uma porcentagem do comprimento total médio da linha e é dada pela eq. (5.4):

$$\% \text{ Erro} = \frac{|\text{Distância Estimada} - \text{Distância Real}|}{\text{Comprimento Total Medio da Linha}} \times 100 \quad (5.4)$$

$$\text{Onde: Comprimento Total Medio da Linha} = \frac{L_{PT} + L_{QT} + L_{PT} + L_{RT}}{2}$$

A matriz impedância série por unidade de comprimento gerada pela rotina *Line Constanst*, utilizada na técnica de localização de falta é apresentada pela tabela 5.1, onde $Z_{a,b,c} = ZPT_{a,b,c} = ZQT_{a,b,c} = ZRT_{a,b,c}$ considerando que as impedâncias da linha são as mesmas para os ramos da linha L_{PT} , L_{QT} e L_{RT} , respectivamente.

TABELA 5.1 - Impedância série da linha de transmissão

$$Z_{a,b,c} = \begin{bmatrix} 2,051651E-01 & 1,526441E-01 & 1,563730E-01 \\ + j 5,236299E+00 & + j 1,369321E+00 & + j 9,433817E-01 \\ 1,526441E-01 & 1,922108E-01 & 1,526441E-01 \\ + j 1,369321E+00 & + j 5,112343E+00 & + j 1,369321E+00 \\ 1,563730E-01 & 1,526441E-01 & 2,051651E-01 \\ + j 9,433817E-01 & + j 1,369321E+00 & + j 5,236299E+00 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

5.3.4.1 EFEITO DOS DIFERENTES TIPOS DE FALTA

É de extrema importância analisar o desempenho do algoritmo localizador, para os diferentes tipos de falta que podem ocorrer na linha de transmissão, principalmente, para as faltas monofásicas à terra que predominam para todos os tipos de configurações de linhas. Essa predominância é ainda mais acentuada em linhas de alta tensão, uma vez que, os grandes espaçamentos entre os condutores dificultam o surgimento de faltas bifásicas e trifásicas.

Uma série de testes foram realizados para verificar a confiabilidade do algoritmo neste aspecto, aplicando-se a localização da falta em incrementos de dez em dez por cento da linha para cada tipo de falta, como mencionado no capítulo 4. Alguns resultados dos casos testados são apresentados através das tabelas 5.2 a 5.6, mostrando o efeito do tipo da falta sobre a precisão atingida para a configuração assimétrica do sistema da Fig. 4.1, com uma resistência de falta de $5\ \Omega$ e um ângulo de incidência de 0° .

Nestes casos apresentados, pode ser observado que o limite de erro ficou abaixo de 1 %, somente em alguns casos isolados o erro chegou a 2 %, sendo esses casos não significativos mantendo a validade e confiabilidade do método.

Os resultados mostraram também, claramente, que o algoritmo apresentado é para qualquer tipo de falta, não exigindo qualquer classificação da mesma.

TABELA 5.2 - Efeito do tipo de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Tipo de Falta
6,0	7,1425	7,0982	0,4760	L _{PT}	AT
15,0	16,0853	16,0339	0,4522	L _{PT}	AT
30,0	30,9834	30,9109	0,4098	L _{PT}	AT
45,0	45,8752	45,7959	0,3647	L _{PT}	AT
60,0	60,7862	60,6927	0,3276	L _{PT}	AT
75,0	75,6476	75,5549	0,2698	L _{PT}	AT
90,0	90,5018	90,4265	0,2091	L _{PT}	AT
105,0	105,4026	105,3046	0,1677	L _{PT}	AT
120,0	120,2530	120,1917	0,1054	L _{PT}	AT
135,0	135,0954	135,0453	0,0397	L _{PT}	AT
144,0	143,9851	143,9663	0,0062	L _{PT}	AT
158,0	157,8250	149,9945	0,0729	L _{QT}	AT
166,0	165,7253	149,9902	0,1144	L _{QT}	AT
174,0	173,6149	149,9995	0,1604	L _{QT}	AT
182,0	181,6335	150,0406	0,1527	L _{QT}	AT
190,0	189,4603	149,9966	0,2249	L _{QT}	AT
198,0	197,4343	150,0840	0,2357	L _{QT}	AT
206,0	205,4962	149,9792	0,2099	L _{QT}	AT
214,0	213,1516	150,0200	0,3535	L _{QT}	AT
224,0	223,1080	150,0794	0,3716	L _{QT}	AT
156,0	149,8372	155,9831	0,0071	L _{RT}	AT
160,0	149,9630	159,8906	0,0456	L _{RT}	AT
170,0	150,0261	169,7401	0,1083	L _{RT}	AT
180,0	150,0896	179,6793	0,1336	L _{RT}	AT
190,0	150,1337	189,6501	0,1458	L _{RT}	AT
200,0	150,1560	199,5885	0,1715	L _{RT}	AT
210,0	150,1244	209,4823	0,2157	L _{RT}	AT
220,0	150,1597	219,3569	0,2679	L _{RT}	AT
230,0	150,1719	229,2817	0,2993	L _{RT}	AT
244,0	150,1587	243,1208	0,3663	L _{RT}	AT

TABELA 5.3 - Efeito do tipo de falta - Falta fase-fase (AC), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Tipo de Falta
6,0	6,6900	6,6821	0,2875	L _{PT}	AC
15,0	15,4061	15,2880	0,1692	L _{PT}	AC
30,0	30,2722	30,0951	0,1134	L _{PT}	AC
45,0	44,5342	44,3435	0,1941	L _{PT}	AC
60,0	62,9723	62,7998	1,2385	L _{PT}	AC
75,0	74,4894	74,0969	0,2127	L _{PT}	AC
90,0	89,7276	89,3050	0,1135	L _{PT}	AC
105,0	103,9768	103,5327	0,4263	L _{PT}	AC
120,0	119,7966	119,7037	0,0847	L _{PT}	AC
135,0	139,9051	139,7746	2,0438	L _{PT}	AC
144,0	143,8280	143,6215	0,0717	L _{PT}	AC
158,0	158,2227	150,1510	0,0928	L _{QT}	AC
166,0	166,0767	150,0852	0,0320	L _{QT}	AC
174,0	174,5774	150,1571	0,2406	L _{QT}	AC
182,0	182,7655	150,2905	0,3190	L _{QT}	AC
190,0	190,5043	150,4009	0,2101	L _{QT}	AC
198,0	198,9756	150,2661	0,4065	L _{QT}	AC
206,0	207,3613	150,0798	0,5672	L _{QT}	AC
214,0	214,7714	149,9010	0,3214	L _{QT}	AC
224,0	225,0283	150,6121	0,4284	L _{QT}	AC
156,0	150,1555	155,8111	0,0787	L _{RT}	AC
160,0	150,1738	160,1678	0,0699	L _{RT}	AC
170,0	150,2352	169,3437	0,2735	L _{RT}	AC
180,0	150,3456	180,4792	0,1996	L _{RT}	AC
190,0	150,3563	187,9540	0,8525	L _{RT}	AC
200,0	150,3458	200,6277	0,2615	L _{RT}	AC
210,0	150,4717	211,5426	0,6428	L _{RT}	AC
220,0	150,4054	220,4372	0,1822	L _{RT}	AC
230,0	150,3887	230,4986	0,2077	L _{RT}	AC
244,0	150,3445	244,1065	0,0444	L _{RT}	AC

TABELA 5.4 - Efeito do tipo de falta - Falta fase-fase-terra (BCT), resistência de falta ($5,0 \Omega$) e ângulo de incidência de falta (0°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Tipo de Falta
6,0	6,7720	6,4554	0,3217	L _{PT}	BCT
15,0	15,6719	15,5796	0,2800	L _{PT}	BCT
30,0	29,8735	29,8379	0,0527	L _{PT}	BCT
45,0	45,4413	45,7514	0,1839	L _{PT}	BCT
60,0	60,5847	60,4616	0,2436	L _{PT}	BCT
75,0	75,4315	75,5579	0,1798	L _{PT}	BCT
90,0	90,0646	90,2313	0,0269	L _{PT}	BCT
105,0	106,1032	106,2333	0,4597	L _{PT}	BCT
120,0	120,2390	120,4245	0,0996	L _{PT}	BCT
135,0	134,0464	134,0034	0,3973	L _{PT}	BCT
144,0	144,0776	144,2292	0,0323	L _{PT}	BCT
158,0	157,9423	149,9644	0,0240	L _{QT}	BCT
166,0	166,1775	150,1395	0,0740	L _{QT}	BCT
174,0	174,0940	150,3246	0,0392	L _{QT}	BCT
182,0	182,3187	150,5166	0,1328	L _{QT}	BCT
190,0	189,7451	149,9195	0,1062	L _{QT}	BCT
198,0	197,6400	150,2539	0,1500	L _{QT}	BCT
206,0	205,5461	150,2863	0,1891	L _{QT}	BCT
214,0	213,5732	150,1408	0,1778	L _{QT}	BCT
224,0	223,5814	150,2033	0,1744	L _{QT}	BCT
156,0	150,1065	155,7703	0,0957	L _{RT}	BCT
160,0	150,0089	160,1248	0,0520	L _{RT}	BCT
170,0	150,2482	170,4682	0,1951	L _{RT}	BCT
180,0	150,2763	180,5178	0,2157	L _{RT}	BCT
190,0	150,3777	189,5137	0,2026	L _{RT}	BCT
200,0	150,4311	199,8181	0,0758	L _{RT}	BCT
210,0	150,4001	210,1304	0,0543	L _{RT}	BCT
220,0	150,3949	220,2546	0,1061	L _{RT}	BCT
230,0	150,3499	229,7607	0,0997	L _{RT}	BCT
244,0	150,3966	244,1466	0,0611	L _{RT}	BCT

TABELA 5.5 - Efeito do tipo de falta - Falta trifásica (ABC), resistência de falta (5,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Tipo de Falta
6,0	6,7217	6,5230	0,3007	L _{PT}	ABC
15,0	15,6126	15,4585	0,2552	L _{PT}	ABC
30,0	29,3496	29,2739	0,2710	L _{PT}	ABC
45,0	44,8797	45,0350	0,0501	L _{PT}	ABC
60,0	62,3076	62,3766	0,9615	L _{PT}	ABC
75,0	74,8000	74,8005	0,0833	L _{PT}	ABC
90,0	90,2785	89,9726	0,1160	L _{PT}	ABC
105,0	104,7864	104,9124	0,0890	L _{PT}	ABC
120,0	119,6895	120,1797	0,1294	L _{PT}	ABC
135,0	137,3637	137,4854	0,9849	L _{PT}	ABC
144,0	143,7206	143,9846	0,1164	L _{PT}	ABC
158,0	157,9301	150,1150	0,0291	L _{QT}	ABC
166,0	166,3427	150,3891	0,1428	L _{QT}	ABC
174,0	174,3851	150,3710	0,1605	L _{QT}	ABC
182,0	182,2778	150,4566	0,1158	L _{QT}	ABC
190,0	189,7885	149,5289	0,0881	L _{QT}	ABC
198,0	197,8016	150,3948	0,0827	L _{QT}	ABC
206,0	205,5495	150,3406	0,1877	L _{QT}	ABC
214,0	213,4720	150,0063	0,2200	L _{QT}	ABC
224,0	223,3886	150,4295	0,2548	L _{QT}	ABC
156,0	150,1027	156,0739	0,0308	L _{RT}	ABC
160,0	149,9537	159,9456	0,0226	L _{RT}	ABC
170,0	150,1705	169,9036	0,0401	L _{RT}	ABC
180,0	149,9469	179,6817	0,1326	L _{RT}	ABC
190,0	150,3936	188,6629	0,5571	L _{RT}	ABC
200,0	150,4756	200,1763	0,0734	L _{RT}	ABC
210,0	150,4908	210,8099	0,3375	L _{RT}	ABC
220,0	150,4610	220,8831	0,3680	L _{RT}	ABC
230,0	150,3689	229,5657	0,1809	L _{RT}	ABC
244,0	150,3513	243,8105	0,0789	L _{RT}	ABC

TABELA 5.6 - Efeito do tipo de falta - Falta trifásico-terra (ABCT), resistência de falta ($5,0 \Omega$) e ângulo de incidência de falta (0°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Tipo de Falta
6,0	5,8518	5,6951	0,0617	L _{PT}	ABCT
15,0	14,7774	14,6882	0,0928	L _{PT}	ABCT
30,0	28,6341	28,6428	0,5691	L _{PT}	ABCT
45,0	44,3983	44,6527	0,2507	L _{PT}	ABCT
60,0	62,4010	62,5213	1,0004	L _{PT}	ABCT
75,0	74,5027	74,6478	0,2072	L _{PT}	ABCT
90,0	90,0698	89,7867	0,0291	L _{PT}	ABCT
105,0	104,6843	104,8868	0,1315	L _{PT}	ABCT
120,0	119,5280	120,1251	0,1967	L _{PT}	ABCT
135,0	137,8015	137,9297	1,1673	L _{PT}	ABCT
144,0	143,6298	143,9002	0,1543	L _{PT}	ABCT
158,0	157,8486	150,1069	0,0631	L _{QT}	ABCT
166,0	166,4600	150,4160	0,1917	L _{QT}	ABCT
174,0	174,3601	150,4029	0,1500	L _{QT}	ABCT
182,0	182,2985	150,5473	0,1244	L _{QT}	ABCT
190,0	189,6500	149,3848	0,1458	L _{QT}	ABCT
198,0	197,6570	150,4427	0,1429	L _{QT}	ABCT
206,0	205,4243	150,3673	0,2399	L _{QT}	ABCT
214,0	213,3983	149,9781	0,2507	L _{QT}	ABCT
224,0	223,4639	150,5375	0,2234	L _{QT}	ABCT
156,0	150,3578	156,3122	0,1301	L _{RT}	ABCT
160,0	150,1259	160,1566	0,0652	L _{RT}	ABCT
170,0	150,3689	170,2651	0,1105	L _{RT}	ABCT
180,0	150,0539	180,0251	0,0105	L _{RT}	ABCT
190,0	150,5568	189,0018	0,4159	L _{RT}	ABCT
200,0	150,6145	200,8492	0,3538	L _{RT}	ABCT
210,0	150,6192	211,7484	0,7285	L _{RT}	ABCT
220,0	150,5815	222,0613	0,8589	L _{RT}	ABCT
230,0	150,4577	230,6618	0,2757	L _{RT}	ABCT
244,0	150,4368	245,4503	0,6043	L _{RT}	ABCT

5.3.4.2 EFEITO DA RESISTÊNCIA DE FALTA

É de vital importância verificar se o cálculo da localização de falta é influenciado pelas mudanças na resistência de falta. Uma série de testes foram realizados para examinar a sensibilidade do localizador de falta, com diferentes valores de resistências de falta. As configurações das resistências de falta utilizadas para o conjunto de simulações em cada tipo de falta, são mostradas na Fig. 4.7.

Os testes foram conduzidos variando a resistência de falta a partir de $1\ \Omega$ até $500\ \Omega$, para cada tipo de falta. Alguns resultados dos casos testados são apresentados através das tabelas 5.7 a 5.14, mostrando o efeito da resistência de falta sobre a precisão atingida para a configuração assimétrica do sistema da Fig. 4.1, sujeita a uma falta fase-terra (AT) e com ângulo de incidência de falta 45° .

Nestes casos, os testes realizados apresentaram porcentagens de erro abaixo de um limite de 1,0 % para resistências de falta menores do que $100\ \Omega$, sendo este, um excelente resultado para o localizador de falta. Para testes com valores de resistências, de 100 a $200\ \Omega$, o algoritmo ainda produziu um resultado satisfatório, com margens de erro menores do que 5 %. O algoritmo apresentou margens de erros mais significativas somente para valores mais elevados de resistências de falta, para localizações de faltas próximas ao terminal de referência. Mesmo assim, a validade do método não é comprometida, devido a raridade de se encontrar situações com valores elevados de resistências de falta.

É então mostrado claramente pelos resultados que o localizador de faltas fornece uma avaliação precisa da posição da falta para valores de resistências de falta inferiores a $200\ \Omega$ englobando a maior parte dos casos encontrados na prática. Uma série extensiva de testes tem mostrado que isto acontece para todos tipos de faltas. Isto é uma vantagem muito significativa sobre as técnicas convencionais, particularmente com aquelas baseadas na medição da impedância de falta, nas quais produzem-se erros excessivos quando se trata de falta resistiva.

TABELA 5.7 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (1,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	6,6468	6,7401	0,2695	L _{PT}	1,0
15,0	15,7187	15,6537	0,2995	L _{PT}	1,0
30,0	30,5551	30,5364	0,2313	L _{PT}	1,0
45,0	45,5535	45,5278	0,2306	L _{PT}	1,0
60,0	60,0426	60,0835	0,0177	L _{PT}	1,0
75,0	75,2809	75,4624	0,1170	L _{PT}	1,0
90,0	90,1889	90,1701	0,0787	L _{PT}	1,0
105,0	105,3372	105,3428	0,1405	L _{PT}	1,0
120,0	120,1265	120,2213	0,0527	L _{PT}	1,0
135,0	134,8340	135,1643	0,0691	L _{PT}	1,0
144,0	143,9534	144,0935	0,0194	L _{PT}	1,0
158,0	157,8738	150,0417	0,0526	L _{QT}	1,0
166,0	165,6753	149,9893	0,1353	L _{QT}	1,0
174,0	173,6086	150,0238	0,1631	L _{QT}	1,0
182,0	181,5976	150,0553	0,1677	L _{QT}	1,0
190,0	189,6492	150,1634	0,1462	L _{QT}	1,0
198,0	197,5464	150,1972	0,1890	L _{QT}	1,0
206,0	204,9423	150,3834	0,4407	L _{QT}	1,0
214,0	213,3226	150,0948	0,2822	L _{QT}	1,0
224,0	223,2185	150,0836	0,3256	L _{QT}	1,0
156,0	150,1861	155,7813	0,0911	L _{RT}	1,0
160,0	150,0260	160,0936	0,0390	L _{RT}	1,0
170,0	150,0710	169,9572	0,0178	L _{RT}	1,0
180,0	149,9934	179,8326	0,0698	L _{RT}	1,0
190,0	150,0579	190,2134	0,0889	L _{RT}	1,0
200,0	150,1613	199,8223	0,0740	L _{RT}	1,0
210,0	150,2479	209,7365	0,1098	L _{RT}	1,0
220,0	150,2397	219,7676	0,0968	L _{RT}	1,0
230,0	150,1986	229,6214	0,1577	L _{RT}	1,0
244,0	150,0803	243,4036	0,2485	L _{RT}	1,0

TABELA 5.8 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta ($17,0 \Omega$) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	5,4925	5,7320	0,2114	L _{PT}	17,0
15,0	14,8210	14,8678	0,0746	L _{PT}	17,0
30,0	29,9365	29,9731	0,0265	L _{PT}	17,0
45,0	45,2344	45,1255	0,0976	L _{PT}	17,0
60,0	59,8102	59,8791	0,0791	L _{PT}	17,0
75,0	75,0681	75,3137	0,0284	L _{PT}	17,0
90,0	90,1644	90,0811	0,0685	L _{PT}	17,0
105,0	105,3496	105,3432	0,1457	L _{PT}	17,0
120,0	120,0529	120,2061	0,0220	L _{PT}	17,0
135,0	134,9470	135,2498	0,0221	L _{PT}	17,0
144,0	144,1711	144,2143	0,0713	L _{PT}	17,0
158,0	158,1835	150,1790	0,0764	L _{QT}	17,0
166,0	165,9950	150,1198	0,0021	L _{QT}	17,0
174,0	174,0575	150,1300	0,0240	L _{QT}	17,0
182,0	182,0551	150,1480	0,0230	L _{QT}	17,0
190,0	190,2872	150,3478	0,1197	L _{QT}	17,0
198,0	198,3106	150,3974	0,1294	L _{QT}	17,0
206,0	206,0993	150,4975	0,0414	L _{QT}	17,0
214,0	214,4359	150,3053	0,1816	L _{QT}	17,0
224,0	224,5560	150,2581	0,2317	L _{QT}	17,0
156,0	150,3891	156,1079	0,0449	L _{RT}	17,0
160,0	150,2867	160,3658	0,1524	L _{RT}	17,0
170,0	150,2834	170,2910	0,1213	L _{RT}	17,0
180,0	150,1436	180,2030	0,0846	L _{RT}	17,0
190,0	150,1709	190,6447	0,2686	L _{RT}	17,0
200,0	150,3149	200,3674	0,1531	L _{RT}	17,0
210,0	150,4416	210,4644	0,1935	L _{RT}	17,0
220,0	150,3680	220,5505	0,2294	L _{RT}	17,0
230,0	150,3288	230,6532	0,2722	L _{RT}	17,0
244,0	150,0998	244,6921	0,2884	L _{RT}	17,0

TABELA 5.9 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (33,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	5,7788	6,2103	0,0922	L _{PT}	33,0
15,0	15,0111	15,2054	0,0046	L _{PT}	33,0
30,0	30,0316	30,1819	0,0132	L _{PT}	33,0
45,0	45,3185	45,1683	0,1327	L _{PT}	33,0
60,0	59,8312	59,9542	0,0703	L _{PT}	33,0
75,0	75,0721	75,3729	0,0300	L _{PT}	33,0
90,0	90,2712	90,1528	0,1130	L _{PT}	33,0
105,0	105,3783	105,4152	0,1576	L _{PT}	33,0
120,0	119,9873	120,2557	0,0053	L _{PT}	33,0
135,0	134,9872	135,2966	0,0053	L _{PT}	33,0
144,0	144,2603	144,3033	0,1085	L _{PT}	33,0
158,0	158,2938	150,2510	0,1224	L _{QT}	33,0
166,0	166,1114	150,1780	0,0464	L _{QT}	33,0
174,0	174,2651	150,2093	0,1104	L _{QT}	33,0
182,0	182,2270	150,1957	0,0946	L _{QT}	33,0
190,0	190,5493	150,4755	0,2289	L _{QT}	33,0
198,0	198,5930	150,5173	0,2471	L _{QT}	33,0
206,0	206,5077	150,5504	0,2115	L _{QT}	33,0
214,0	214,8020	150,4343	0,3342	L _{QT}	33,0
224,0	224,8456	150,3397	0,3523	L _{QT}	33,0
156,0	150,4623	156,2653	0,1105	L _{RT}	33,0
160,0	150,3504	160,4341	0,1809	L _{RT}	33,0
170,0	150,3128	170,3940	0,1642	L _{RT}	33,0
180,0	150,1918	180,3630	0,1513	L _{RT}	33,0
190,0	150,1673	190,7738	0,3224	L _{RT}	33,0
200,0	150,3799	200,5620	0,2342	L _{RT}	33,0
210,0	150,4935	210,6703	0,2793	L _{RT}	33,0
220,0	150,3729	220,6680	0,2783	L _{RT}	33,0
230,0	150,3182	230,8000	0,3333	L _{RT}	33,0
244,0	149,9824	244,6252	0,2605	L _{RT}	33,0

TABELA 5.10 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (75,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	7,6038	8,4676	0,6682	L _{PT}	75,0
15,0	16,7234	17,2993	0,7181	L _{PT}	75,0
30,0	31,5968	32,0268	0,6653	L _{PT}	75,0
45,0	46,6433	46,5318	0,6847	L _{PT}	75,0
60,0	60,7981	61,1616	0,3325	L _{PT}	75,0
75,0	75,7212	76,3173	0,3005	L _{PT}	75,0
90,0	90,9347	90,9250	0,3895	L _{PT}	75,0
105,0	105,7406	105,9209	0,3086	L _{PT}	75,0
120,0	119,9875	120,5378	0,0052	L _{PT}	75,0
135,0	134,8795	135,4137	0,0502	L _{PT}	75,0
144,0	144,1378	144,2901	0,0574	L _{PT}	75,0
158,0	158,0229	150,2231	0,0096	L _{QT}	75,0
166,0	165,7203	150,1023	0,1165	L _{QT}	75,0
174,0	173,8319	150,0790	0,0700	L _{QT}	75,0
182,0	181,6134	150,0430	0,1611	L _{QT}	75,0
190,0	189,9689	150,5065	0,0130	L _{QT}	75,0
198,0	197,9935	150,5708	0,0027	L _{QT}	75,0
206,0	205,9482	150,5183	0,0216	L _{QT}	75,0
214,0	214,0889	150,5057	0,0370	L _{QT}	75,0
224,0	224,0621	150,4131	0,0259	L _{QT}	75,0
156,0	150,1781	156,2086	0,0869	L _{RT}	75,0
160,0	150,1271	160,2439	0,1016	L _{RT}	75,0
170,0	150,0248	170,0713	0,0297	L _{RT}	75,0
180,0	149,8560	179,8558	0,0601	L _{RT}	75,0
190,0	149,7805	190,1613	0,0672	L _{RT}	75,0
200,0	150,1206	199,8802	0,0499	L _{RT}	75,0
210,0	150,2308	209,7567	0,1014	L _{RT}	75,0
220,0	150,0307	219,4367	0,2347	L _{RT}	75,0
230,0	150,0045	229,5072	0,2054	L _{RT}	75,0
244,0	149,5622	242,8962	0,4599	L _{RT}	75,0

TABELA 5.11 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (100,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	8,9818	10,0806	1,2424	L _{PT}	100,0
15,0	18,0449	18,8114	1,2687	L _{PT}	100,0
30,0	32,7893	33,4146	1,1622	L _{PT}	100,0
45,0	47,7026	47,6699	1,1261	L _{PT}	100,0
60,0	61,6125	62,1360	0,6719	L _{PT}	100,0
75,0	76,3009	77,1092	0,5421	L _{PT}	100,0
90,0	91,4218	91,5939	0,5924	L _{PT}	100,0
105,0	106,0228	106,3189	0,4262	L _{PT}	100,0
120,0	120,0227	120,7001	0,0094	L _{PT}	100,0
135,0	134,7847	135,4850	0,0897	L _{PT}	100,0
144,0	143,9410	144,2401	0,0246	L _{PT}	100,0
158,0	157,6761	150,0967	0,1349	L _{QT}	100,0
166,0	165,3318	150,0204	0,2784	L _{QT}	100,0
174,0	173,3315	149,9686	0,2786	L _{QT}	100,0
182,0	181,0090	149,9329	0,4129	L _{QT}	100,0
190,0	189,2959	150,4369	0,2934	L _{QT}	100,0
198,0	197,2634	150,5013	0,3069	L _{QT}	100,0
206,0	205,1730	150,3875	0,3446	L _{QT}	100,0
214,0	213,2852	150,4525	0,2978	L _{QT}	100,0
224,0	223,1603	150,3759	0,3499	L _{QT}	100,0
156,0	149,9292	156,0798	0,0332	L _{RT}	100,0
160,0	149,8581	159,9865	0,0056	L _{RT}	100,0
170,0	149,7119	169,6638	0,1401	L _{RT}	100,0
180,0	149,5758	179,3626	0,2656	L _{RT}	100,0
190,0	149,4561	189,4442	0,2316	L _{RT}	100,0
200,0	149,9163	199,1248	0,3647	L _{RT}	100,0
210,0	149,9388	208,8023	0,4991	L _{RT}	100,0
220,0	149,7317	218,3210	0,6996	L _{RT}	100,0
230,0	149,6275	228,2540	0,7275	L _{RT}	100,0
244,0	149,2993	241,5219	1,0325	L _{RT}	100,0

TABELA 5.12 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (150,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	12,2833	13,8937	2,6180	L _{PT}	150,0
15,0	21,2611	22,3990	2,6088	L _{PT}	150,0
30,0	35,7627	36,6592	2,4011	L _{PT}	150,0
45,0	50,1370	50,3395	2,1404	L _{PT}	150,0
60,0	63,6188	64,4837	1,5078	L _{PT}	150,0
75,0	77,8580	79,0578	1,1908	L _{PT}	150,0
90,0	92,5755	93,0475	1,0731	L _{PT}	150,0
105,0	106,7323	107,2611	0,7218	L _{PT}	150,0
120,0	120,2173	121,2069	0,0905	L _{PT}	150,0
135,0	134,4976	135,5109	0,2093	L _{PT}	150,0
144,0	143,4350	143,9646	0,2354	L _{PT}	150,0
158,0	156,7466	149,6497	0,5223	L _{QT}	150,0
166,0	164,2082	149,6716	0,7466	L _{QT}	150,0
174,0	171,9046	149,5384	0,8731	L _{QT}	150,0
182,0	179,4245	149,5687	1,0731	L _{QT}	150,0
190,0	187,5051	150,0150	1,0396	L _{QT}	150,0
198,0	195,2470	150,1522	1,1471	L _{QT}	150,0
206,0	203,0826	150,0194	1,2156	L _{QT}	150,0
214,0	211,0327	150,1716	1,2364	L _{QT}	150,0
224,0	220,8232	150,1384	1,3237	L _{QT}	150,0
156,0	149,1872	155,4831	0,2154	L _{RT}	150,0
160,0	149,1472	159,2370	0,3179	L _{RT}	150,0
170,0	149,0008	168,6364	0,5681	L _{RT}	150,0
180,0	148,7853	177,8736	0,8860	L _{RT}	150,0
190,0	148,6746	187,7010	0,9579	L _{RT}	150,0
200,0	149,0299	196,9959	1,2517	L _{RT}	150,0
210,0	149,1802	206,3677	1,5135	L _{RT}	150,0
220,0	148,9328	215,4054	1,9144	L _{RT}	150,0
230,0	148,8401	225,0059	2,0809	L _{RT}	150,0
244,0	148,4481	237,7733	2,5944	L _{RT}	150,0

TABELA 5.13 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (200,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	16,4090	18,3992	4,3371	L _{PT}	200,0
15,0	25,0923	26,5584	4,2051	L _{PT}	200,0
30,0	39,2125	40,4102	3,8385	L _{PT}	200,0
45,0	53,0934	53,5613	3,3723	L _{PT}	200,0
60,0	66,0138	67,2008	2,5058	L _{PT}	200,0
75,0	79,7694	81,2107	1,9872	L _{PT}	200,0
90,0	93,8889	94,6764	1,6204	L _{PT}	200,0
105,0	107,5976	108,3583	1,0823	L _{PT}	200,0
120,0	120,3746	121,6987	0,1561	L _{PT}	200,0
135,0	134,0835	135,4906	0,3819	L _{PT}	200,0
144,0	142,7377	143,5964	0,5260	L _{PT}	200,0
158,0	155,5212	149,0888	1,0328	L _{QT}	200,0
166,0	162,8535	149,1177	1,3110	L _{QT}	200,0
174,0	149,0385	149,0385	1,5981	L _{QT}	200,0
182,0	177,3684	148,9995	1,9298	L _{QT}	200,0
190,0	185,0864	149,5325	2,0473	L _{QT}	200,0
198,0	192,7165	149,6594	2,2015	L _{QT}	200,0
206,0	200,3530	149,5232	2,3529	L _{QT}	200,0
214,0	208,0691	149,6332	2,4712	L _{QT}	200,0
224,0	217,4982	149,6485	2,7091	L _{QT}	200,0
156,0	148,2574	154,7953	0,5020	L _{RT}	200,0
160,0	148,1994	158,2413	0,7328	L _{RT}	200,0
170,0	148,0669	167,2305	1,1540	L _{RT}	200,0
180,0	147,9047	176,1013	1,6245	L _{RT}	200,0
190,0	147,6404	185,3721	1,9283	L _{RT}	200,0
200,0	148,1814	194,4608	2,3080	L _{RT}	200,0
210,0	148,1149	203,2167	2,8264	L _{RT}	200,0
220,0	147,8844	211,8717	3,3868	L _{RT}	200,0
230,0	147,8496	220,9441	3,7733	L _{RT}	200,0
244,0	147,4700	233,0361	4,5683	L _{RT}	200,0

TABELA 5.14 - Efeito da resistência de falta - Falta fase-terra (AT), resistência de falta (500,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Resistência Falta (Ω)
6,0	38,9111	24,1259	13,7130	L _{PT}	500,0
15,0	48,3422	33,6296	13,8926	L _{PT}	500,0
30,0	64,4044	51,0908	14,3351	L _{PT}	500,0
45,0	79,7484	65,4263	14,4785	L _{PT}	500,0
60,0	89,6921	79,1935	12,3717	L _{PT}	500,0
75,0	105,1132	97,3590	12,5472	L _{PT}	500,0
90,0	119,2007	110,2169	12,1669	L _{PT}	500,0
105,0	131,9549	121,8495	11,2312	L _{PT}	500,0
120,0	141,3553	132,9382	8,8980	L _{PT}	500,0
135,0	155,5369	150,6904	8,5570	L _{PT}	500,0
144,0	162,8024	157,0027	7,8343	L _{PT}	500,0
158,0	173,0295	160,6149	6,2623	L _{QT}	500,0
166,0	178,4334	157,7381	5,1806	L _{QT}	500,0
174,0	184,4254	155,5049	4,3439	L _{QT}	500,0
182,0	188,4404	153,5484	2,6835	L _{QT}	500,0
190,0	194,5846	153,7191	1,9102	L _{QT}	500,0
198,0	200,8372	153,3457	1,1822	L _{QT}	500,0
206,0	206,9893	151,6510	0,4122	L _{QT}	500,0
214,0	213,8630	151,4771	0,0571	L _{QT}	500,0
224,0	221,5689	150,2691	1,0130	L _{QT}	500,0
156,0	167,6428	165,4930	3,9554	L _{RT}	500,0
160,0	167,7702	169,1688	3,8203	L _{RT}	500,0
170,0	168,3407	178,7014	3,6256	L _{RT}	500,0
180,0	168,6465	186,8582	2,8576	L _{RT}	500,0
190,0	170,7037	199,2516	3,8548	L _{RT}	500,0
200,0	171,5716	209,5175	3,9656	L _{RT}	500,0
210,0	172,2297	217,9217	3,3007	L _{RT}	500,0
220,0	172,7924	225,0371	2,0988	L _{RT}	500,0
230,0	172,1994	230,7152	0,2980	L _{RT}	500,0
244,0	172,3396	240,7959	1,3350	L _{RT}	500,0

5.3.4.3 EFEITO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE FALTA

Na prática, as faltas elétricas podem ocorrer em qualquer ponto, na onda de tensão, podendo isso acontecer desde um valor mínimo (forma de onda de tensão passando por zero) até um valor máximo (forma de onda de tensão passando por um máximo) na fase ou fases faltosas. Do ponto de vista de distorções harmônicas, o pior caso é quando as faltas ocorrem próximas ou na tensão passando por um máximo. No outro extremo, quando as faltas ocorrem próximas ou na tensão passando por zero, as distorções são extremamente pequenas, devido a forma de onda não ter uma grande e repentina mudança. Neste caso nota-se o aparecimento do componente DC na ondas de corrente.

Dessa maneira é de grande importância verificar o comportamento do algoritmo para as faltas em diferentes ângulos de incidência. Este item analisa o efeito da variação do ângulo de incidência na precisão obtida. Os testes foram realizados para diferentes ângulos de incidência de falta, variando de 0° até 90° , em passos de 45° para uma falta ABT. Alguns dos resultados dos casos testados são apresentados através das tabelas 5.15 a 5.17, mostrando o grau de exatidão encontrado para a configuração assimétrica do sistema da Fig. 4.1, sujeita a uma falta fase-fase-terra (ABT) e com resistência de falta $50,0 \Omega$.

Nestes casos, os testes realizados apresentaram porcentagens de erro abaixo de um limite de 1,5 % para a maioria dos casos, somente em alguns casos isolados com ângulos de incidência de 45° e 90° os erros atingiram a 2,5 %.

Os resultados mostram claramente que o algoritmo mantém o alto grau de precisão, o qual é praticamente independente do ângulo de incidência de falta.

TABELA 5.15 - Efeito do ângulo de incidência de falta - Falta fase-fase-terra (ABT), resistência de falta (50,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (0°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Ângulo de Falta (°)
6,0	7,3727	6,8409	0,5720	L _{PT}	0
15,0	15,9721	15,8702	0,4051	L _{PT}	0
30,0	30,5365	30,0959	0,2236	L _{PT}	0
45,0	45,6573	45,9140	0,2739	L _{PT}	0
60,0	58,9929	58,9104	0,4196	L _{PT}	0
75,0	75,5531	75,5470	0,2305	L _{PT}	0
90,0	90,4051	90,4956	0,1688	L _{PT}	0
105,0	106,4155	106,4721	0,5898	L _{PT}	0
120,0	120,5126	120,6618	0,2136	L _{PT}	0
135,0	133,1283	133,1272	0,7799	L _{PT}	0
144,0	144,6005	144,6292	0,2502	L _{PT}	0
158,0	158,0452	150,0114	0,0188	L _{QT}	0
166,0	165,9334	150,2505	0,0278	L _{QT}	0
174,0	173,8586	150,3008	0,0589	L _{QT}	0
182,0	182,0721	150,6378	0,0300	L _{QT}	0
190,0	189,7386	149,7797	0,1089	L _{QT}	0
198,0	197,4818	150,2420	0,2159	L _{QT}	0
206,0	205,5822	150,3809	0,1741	L _{QT}	0
214,0	213,4631	150,4344	0,2237	L _{QT}	0
224,0	223,0325	150,2659	0,4031	L _{QT}	0
156,0	150,2258	155,8378	0,0676	L _{RT}	0
160,0	150,1170	159,9375	0,0260	L _{RT}	0
170,0	150,3991	170,8711	0,3630	L _{RT}	0
180,0	150,1845	179,8331	0,0695	L _{RT}	0
190,0	150,3775	190,5452	0,2272	L _{RT}	0
200,0	150,4814	199,5208	0,1997	L _{RT}	0
210,0	150,6119	209,9166	0,0348	L _{RT}	0
220,0	150,6510	220,3576	0,1490	L _{RT}	0
230,0	150,5623	229,8045	0,0815	L _{RT}	0
244,0	150,5289	243,9400	0,0250	L _{RT}	0

TABELA 5.16 - Efeito do ângulo de incidência de falta - Falta fase-fase-terra (ABT), resistência de falta (50,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (45°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Ângulo de Falta (°)
6,0	5,7416	5,6683	0,1077	L _{PT}	45
15,0	14,7441	14,6530	0,1066	L _{PT}	45
30,0	30,8576	30,3514	0,3573	L _{PT}	45
45,0	44,5520	44,8555	0,1867	L _{PT}	45
60,0	55,1715	55,0309	2,0119	L _{PT}	45
75,0	74,8381	74,1316	0,0675	L _{PT}	45
90,0	89,0822	89,4401	0,3824	L _{PT}	45
105,0	103,0968	102,8445	0,7930	L _{PT}	45
120,0	119,9036	119,7090	0,0402	L _{PT}	45
135,0	130,1912	130,1539	2,0037	L _{PT}	45
144,0	145,0972	145,0251	0,4572	L _{PT}	45
158,0	158,4881	150,4479	0,2034	L _{QT}	45
166,0	163,9458	149,8360	0,8559	L _{QT}	45
174,0	173,2303	149,9573	0,3207	L _{QT}	45
182,0	181,0527	150,4261	0,3947	L _{QT}	45
190,0	190,2592	149,5831	0,1080	L _{QT}	45
198,0	198,0426	150,5187	0,0178	L _{QT}	45
206,0	207,3230	150,6465	0,5512	L _{QT}	45
214,0	213,9844	150,5883	0,0065	L _{QT}	45
224,0	223,6080	149,8560	0,1633	L _{QT}	45
156,0	150,1544	156,4681	0,1951	L _{RT}	45
160,0	150,2143	160,6607	0,2753	L _{RT}	45
170,0	150,2312	171,9037	0,7932	L _{RT}	45
180,0	149,8347	179,3002	0,2916	L _{RT}	45
190,0	150,1776	193,3176	1,3823	L _{RT}	45
200,0	150,2784	200,8254	0,3439	L _{RT}	45
210,0	150,3817	209,8253	0,0728	L _{RT}	45
220,0	150,9061	220,5368	0,2237	L _{RT}	45
230,0	150,5371	231,5873	0,6614	L _{RT}	45
244,0	150,3133	244,9595	0,3998	L _{RT}	45

TABELA 5.17 - Efeito do ângulo de incidência de falta - Falta fase-fase-terra (ABT), resistência de falta (50,0 Ω) e ângulo de incidência de falta (90°)

Distância Real da Falta (km)	d (km)	d' (km)	Erro (%)	Ramo da Falta	Ângulo de Falata (°)
6,0	2,9617	2,4296	1,2659	L _{PT}	90
15,0	11,7053	11,9013	1,3728	L _{PT}	90
30,0	27,6766	26,9760	0,9681	L _{PT}	90
45,0	42,0542	42,7312	1,2274	L _{PT}	90
60,0	63,5237	63,6751	1,4682	L _{PT}	90
75,0	72,8711	72,6730	0,8870	L _{PT}	90
90,0	88,5866	88,5490	0,5889	L _{PT}	90
105,0	104,0819	103,8225	0,3826	L _{PT}	90
120,0	119,4821	120,1287	0,2158	L _{PT}	90
135,0	140,9630	140,9625	2,4846	L _{PT}	90
144,0	144,7508	144,5700	0,3128	L _{PT}	90
158,0	158,8100	150,0475	0,3375	L _{QT}	90
166,0	166,2444	150,3897	0,1018	L _{QT}	90
174,0	175,5225	150,5433	0,6344	L _{QT}	90
182,0	184,6541	151,5824	1,1059	L _{QT}	90
190,0	191,5626	149,1807	0,6511	L _{QT}	90
198,0	199,9901	150,2469	0,8292	L _{QT}	90
206,0	209,6100	150,3551	1,5042	L _{QT}	90
214,0	216,6780	150,2432	1,1158	L _{QT}	90
224,0	226,4614	150,8662	1,0256	L _{QT}	90
156,0	150,5995	155,3659	0,2642	L _{RT}	90
160,0	150,1648	160,3405	0,1419	L _{RT}	90
170,0	150,5631	171,1943	0,4976	L _{RT}	90
180,0	149,8307	180,7757	0,3232	L _{RT}	90
190,0	150,1354	187,4902	1,0457	L _{RT}	90
200,0	150,2615	200,8989	0,3746	L _{RT}	90
210,0	150,7469	213,9926	1,6636	L _{RT}	90
220,0	150,6618	223,2954	1,3731	L _{RT}	90
230,0	150,3564	232,8472	1,1863	L _{RT}	90
244,0	150,3058	247,7631	1,5680	L _{RT}	90

5.3.4.4 EFEITO DA SINCRONIZAÇÃO DOS DADOS

Como descrito na seção 3.2.2, a entrada dos dados do algoritmo localizador de faltas, proveniente dos três terminais da linha, deve possuir uma referência de tempo comum no sentido de evitar os erros causados pela não sincronização dos dados. A técnica desenvolvida para minimizar os erros é descrita em detalhes na seção 3.2.2.1, e as Fig. 5.10 e 5.11 mostram o efeito da não sincronização dos dados para as faltas fase-terra (AT), fase-fase (AB), respectivamente. As faltas foram aplicadas em diferentes pontos do ramo L_{PT} com uma resistência de falta de 33Ω e um ângulo de incidência de 0° . É evidente, pelas figuras, que o terminal P é tomado como referência, e se existe um desequilíbrio (não sincronismo) nos dados do terminal Q e R de 1 e 2 amostras respectivamente, então, existe uma leve deterioração na precisão obtida, comparada com os dados perfeitamente sincronizados, sendo este um limite ainda aceito pelo algoritmo. Entretanto, se por alguma razão anormal os dados do terminal R não estão sincronizados por um número grande de amostras, por exemplo 5, então existe um significativo aumento no erro, novamente como mostra as figuras. Isto mostra claramente a necessidade de incorporar no algoritmo localizador de faltas um mecanismo para sincronização dos dados para calcular as distâncias das faltas.

Como mencionado anteriormente, a técnica descrita na seção 3.2.2.1 fornece um alto grau de precisão; para os dados não sincronizados, ela detecta o desequilíbrio (não sincronismo) e muda o número apropriado de amostras da tensão e da corrente em cada terminal, restaurando a sincronização dos dados e consequentemente a sua precisão na localização. Para 100 % dos casos estudados a subrotina de sincronização atuou de forma a sincronizar perfeitamente os dados provenientes dos três terminais.

FIGURA 5.10 - Efeito dos dados não sincronizados sobre a precisão do algoritmo localizador de falta para uma falta fase-terra (AT).

FIGURA 5.11 - Efeito dos dados não sincronizados sobre a precisão do algoritmo localizador de falta para uma falta fase-fase (AB).

Capítulo 6

Conclusão

Neste capítulo apresenta-se a conclusão do trabalho.

6.1 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método para calcular a localização de faltas em linhas de transmissão de três terminais. O algoritmo localizador de falta é baseado na utilização dos fasores de tensão e corrente trifásicos a 60 Hz, tomados nos três terminais da linha e, faz uso da TDF para extrair precisamente os fasores fundamentais dos sinais. O algoritmo também possui uma técnica efetiva de sincronização de dados, além de uma subrotina precisa para classificação de faltas quanto ao tipo, tornando o método bastante eficaz e com um alto grau de fidelidade para a localização da falta.

O algoritmo proposto foi testado utilizando um microcomputador *Pentium* 100 MHz, com dados obtidos através de simulações do *software* ATP para uma configuração típica encontrada na prática, ilustrada na Fig. 4.1. A configuração utilizada é assimétrica com comprimentos de linha até o terminal T desiguais e fontes com diferentes capacidades, no sentido de demonstrar a flexibilidade do algoritmo. As linhas são consideradas transpostas e o algoritmo utiliza somente as impedâncias séries da mesma, desprezando a capacitância *shunt*. Os resultados mostraram

claramente que o algoritmo proposto obteve um alto grau de precisão no cálculo da distância da falta para uma variedade de condições, tais como: diversas localizações, resistências, ângulos de incidência e diferentes tipos de faltas, assim como mostrado no capítulo 5. O erro percentual em termos de exatidão na maioria dos casos analisados foi menor que 2 %, e a maior concentração de erros foram próximos aos barramentos. Uma alta precisão foi também encontrada para a técnica de sincronização dos dados, identificação do ponto de incisão da falta, filtragem dos dados e classificação da falta.

Pela teoria exposta na seção 3.2.5.1, e pelos resultados apresentados na seção 5.3.5.2 pode se observar que para valores de resistência de falta inferiores a 200 Ω , a precisão do algoritmo localizador de falta não é afetada. Somente para as faltas com resistência de falta com valores mais elevados ($R_F=500 \Omega$), o algoritmo apresenta alguns erros significativos para as localizações próximas ao terminal de referência.

Deve ainda ser ressaltado que a técnica pode ser aplicada para qualquer tipo de falta, não exigindo uma pré classificação da mesma. Isto pode ser comprovado através dos resultados apresentados na seção 5.3.5.1, onde os erros ficaram abaixo de 1% nos casos analisados, demonstrando mais uma vez a eficiência do algoritmo.

O ângulo de incisão de falta também não influencia na precisão obtida pelo algoritmo localizador, os resultados na seção 5.3.5.3 mostram claramente o excelente desempenho alcançado para os diferentes ângulos de incisão testados.

Com relação ao efeito da sincronização dos dados sobre o algoritmo localizador de faltas, foi estabelecido que níveis de não sincronização podem ser tolerados pelo algoritmo sem afetar a precisão. Neste sentido, é mostrado que se um pequeno desequilíbrio (não sincronismo) dos dados ocorre entre os três terminais (1 amostra no terminal Q e 2 amostras no terminal R, tomando o terminal P como referência), isto não afeta significativamente a precisão encontrada. Contudo, se um desequilíbrio (não sincronismo) maior de amostras ocorre (1 mostra no terminal Q e 5 amostras no terminal R), então um erro significativo está presente. Isto mostra claramente a necessidade de implementação da técnica de sincronização dos dados antes do cálculo da distância da falta. A técnica implementada mostra excelentes resultados com alto grau de precisão. Como mencionado anteriormente, a técnica

detecta o desequilíbrio (não sincronismo) dos dados e muda o número apropriado de amostras de tensão e corrente em cada terminal, com o objetivo de sincronizar os mesmos e conseqüentemente obter a precisão máxima.

O algoritmo de localização de falta que utiliza dados provenientes dos três terminais da linha garante um resultado preciso como demonstrado neste trabalho. Porém, possui o inconveniente de necessitar um canal de comunicação entre os terminais e o processador para envio de dados. Contudo, o algoritmo aqui implementado não necessita de canais de comunicação exclusivos ou extremamente velozes, podendo para isso utilizar apenas um modem ligado à uma linha telefônica comum.

Finalmente, conclui-se que o algoritmo apresentado demonstrou um alto grau de precisão para as diversas situações testadas, destacando-se sua confiabilidade e aplicabilidade, bem como a viabilidade de sua implementação prática.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

- AGGARWAL, R. K.; COURY, D. V.; JOHNS, A. T.; KALAM, A. (1993). A practical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.8, n.3, p.874-882, jul.
- ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM - Rule Book (1987). Leuven EMTP Center (LEC).
- AMON FILHO, J.; PEREIRA, M. P. (1994). *Curso básico sobre a atualização do ATP*: realizado 17 a 21 de outubro de 1994. São Paulo.
- BURRUS, C. S.; PARKS, T. W. (1985). *DFT/FFT and convolution algorithms - Theory and implementation*. Wiley Interscience.
- COOK, V. (1986). Fundamental aspects of fault location algorithms used in distance protection. *IEE Proceedings*, v.133, Pt. C, n.6, p.359-368, set.
- COURY, D. V. (1987). *Um estimador ótimo aplicado a proteção digital do sistema de potência*. Tese (Mestrado) - EESC/USP.

- COURY, D. V. (1992). *A practical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders*. Tese (Doutorado) - Universidade de Bath.
- ERIKSSON, L.; SAHA, M. M.; ROCKEFELLER, G. D. (1985). An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.PAS-104, n.2, p.424-436, feb.
- GAUTIER, L. R. (1996). *Localizadores digitais de faltas para linhas de transmissão de alta tensão*. Tese (Mestrado) - EESC/USP.
- GERALDE, A. L. J. (1996). *Aplicação de relés adaptativos na proteção digital à distância*. Tese (Mestrado) - EESC/USP.
- GIRGIS, A. A.; HART, D. V.; PETERSON, W. L. (1992a). A new fault location technique for two-and three-terminal lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.7, n.1, p.98-107, jan.
- GIRGIS, A. A.; FALLON, C. M. (1992b). Fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorded data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.7, n.4, p.1396-1945, out.
- HILBURN, J. L.; JOHNSON, D. E. (1983). *Manual of active filter design*. McGraw Hill Book Company.
- IBE, A. O.; CORY, B. J. (1986). A travelling wave-based fault locator for two-and three-terminal networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.PWRD-1, n.2, p.283-288, apr.
- IBE, A. O.; CORY, B. J. (1987). Fault location algorithm for multiphase power lines. *IEE Proceedings*, v.134, Pt. C, n.1, p.43-50, jan.

- JEAYASURYA, B.; RAHMAN, M. A. (1989). Accurate fault location of transmission lines using microprocessors. *IEE Fourth International Conference*.
- JOHNS, A. B.; JAMALI, S. (1990). Accurate fault location technique for power transmission lines. *IEE Proceedings*, v.137, Pt. C, n.6, p.395-402, set.
- KOHLAS, J. (1973). Estimation of fault location on power lines. *Proceedings of the 3rd IFAC Symposium*, the Hague/Delft, the Netherlands, jun.
- LAWRENCE, D. J.; WASER, D. L. (1988). Transmission line fault location using digital fault recorders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.3, n.2, p.496-502, apr.
- MEYER, W. S.; DOMMEL, H. W. (1974). Numerical modelling of frequency-dependent transmission-line parameters in an electromagnetic transients program. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.PAS-99, p.1401-1409, set/out.
- MOORE, P. J.; ÖHLÉN, C.; AGGARWAL, R. K. (1995). *Power System Protection*. 1.ed London, United Kingdom, Ed. The Electricity Training Association. Cap.4, p.58-90: Numeric protection. v.4: Digital protection and signalling.
- MORRISON, L. F.; YANG Q. (1987). Fault location on high voltage transmission lines using solid state disturbance recorders. *IEEE/CSEE Joint Conference on High Voltage Transmission in China*, p.154-160, out.
- MURUOKA, M.; MITANI, I.; INAGAKI, J. (1984). Microprocessor-based fault locator. *Toshiba Review*, n.48, Summer, p.11-14.

- PHADKE, A. G. (1988). *Computer relaying for power systems*. Inglaterra, Research Studies Press LTD.
- RICHARDS, G. G.; TAN, O. T. (1982). An accurate location estimator for transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.PAS-101, n.4, p.945-950, apr.
- SACHDEV, M. S.; AGGARWAL, R. (1985). Accurate fault location estimates from digital impedance relay measurements. *IEE Conference Publication*, n.249, p.193-198.
- SAHA, M. M.; ERIKSSON, L. (1985). Microcomputer-based accurate fault locator with remote-end infeed compensation. *IEE Conference Publication*, n.249, p.193-198, apr.
- SCHWEITZER, E. (1982). Evaluation and development of transmission line fault locating techniques which use sinusoidal steady-state information. *Ninth Annual Western Relay Conference*, Spokane, Washington, Usa.
- SCHWEITZER, E.; JACHINOWSKI, J. (1981). A prototype microprocessor based system for transmission line protection and monitoring. *Eight Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, Usa.
- SERRA, C. P. (1983). *Teoria e projeto de filtros*. Série ouro CPQD, v.1, ed. Limitada.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. (1981). A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part I - Fourier Transformation method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.PAS-100, n.3, p.1316-1322, mar.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.PAS-101, n.8, p.2892-2898, aug.

TAVARES, M. C. (1994). *Destro interface gráfica para ATP*.

WESTLIN, S. E.; BUBENKO, J. A. (1976). Newton-Raphson technique applied to fault location problem. *IEEE PES Summer Meeting*, Portland, jul 18-23.