Campus de São Carlos

Localizadores digitais de faltas para linhas
de transmissão de alta tensão

Luiz Reinaldo Gautier

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Localizadores Digitais de Faltas para Linhas de Transmissão de Alta Tensão

DEDALUS - Acervo - EESC

31100013453

Luiz Reinaldo Gautier

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 V. Coury

São Carlos
1996

Class.	Tese - EESC
Cutl.	2411
Tombo	049/96

Electricidade

st 0744217

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

G277L Gautier, Luiz Reinaldo
Localizadores digitais de faltas para linhas de
transmissão de alta tensão / Luiz Reinaldo Gautier.
-- São Carlos, 1996.
88p.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.
Orientador: Prof. Dr. Denis V. Coury

1. Localizadores de faltas. 2. Linhas de
transmissão. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 15-2-1996
pela Comissão Julgadora:

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

Prof. Doutor ADRIANO ALBER DE FRANÇA M. CARNEIRO
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor JOSÉ PISSOLATO FILHO
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Dr. EDUARDO CLETO PIRES

Coordenador da Área de Engenharia Elétrica
Prof. Dr. GERALDO ROBERTO M. DA COSTA

*Aos meus pais, Theobaldo e Dulce, aos
meus irmãos e cunhados, por tudo que
fizeram e continuam fazendo para que
eu realize meus desejos.*

*À Paula, pelo amor, paciência e
incentivo irrestritos, que tornaram
este trabalho menos árduo.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Doutor Denis Vinicius Coury, pela paciente e segura orientação em todas as fases deste trabalho, e também pela proveitosa convivência e amizade.
- Aos docentes do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, pela atenção recebida.
- Aos funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, pela colaboração e atenção de todos os momentos.
- Aos colegas do curso de Pós-Graduação e aos alunos de iniciação científica, pelo estímulo e amizade.
- À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.
- À CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTAS DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS, ETC.....	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 - Localizadores de faltas para linhas de transmissão	01
1.2 - “Hardware”de um localizador digital de faltas	03
1.3 - “Software”para um localizador digital de faltas	04
1.4 - Objetivos	06
1.5 - Organização do texto	06
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO	08
2.1 - Introdução	08
2.2 - Algoritmos que utilizam dados de um terminal da linha	09
2.3 - Algoritmos que utilizam dados dos dois terminais da linha de transmissão	18
3 - LOCALIZADOR DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO	25
3.1 - Introdução	25
3.2 - Localizador de faltas com dados provenientes de um único terminal da linha	27
3.2.1 - Detecção da falta	29

3.2.2 - Extração dos fasores fundamentais	30
3.2.3 - Obtenção dos componentes superpostos	32
3.2.4 - Classificação da falta	34
3.2.5 - Transformação modal	36
3.2.6 - Teoria fundamental e equacionamentos do localizador.....	38
3.3 - Algoritmo de localização com dados provenientes	
dos dois terminais da linha	45
3.3.1 - Detecção do instante de ocorrência da falta	47
3.3.2 - Extração dos fasores fundamentais	47
3.3.3 - Sincronização dos dados	47
3.3.4 - Classificação da falta	48
3.3.5 - Teoria fundamental e equacionamentos do localizador.....	49
 4 -TESTES REALIZADOS PARA OS LOCALIZADORES	
ESTUDADOS	52
4.1 - Introdução	52
4.2 - Testes da técnica baseada em dados provenientes	
de um único terminal	55
4.2.1 - Determinação do instante de ocorrência da falta	56
4.2.2 - Extração dos fasores fundamentais das ondas de tensão e	
corrente através da TDF	56
4.2.3 - Classificação da falta	58
4.2.4.- Cálculo da distância da falta em relação ao terminal local.....	58
4.2.5 - Influência dos tipos de falta	61
4.2.6 - Efeito da resistência de falta	61
4.2.7 - Efeito da taxa amostral utilizada	63
4.2.8 - Efeito de diferentes capacidades de curto circuito	
na fonte local	66
4.2.9 - Efeito do comprimento da linha de transmissão	66
4.3 - Testes do algoritmo com dados obtidos nos dois terminais.....	66

4.3.1 - Estimção da distância da falta em relação ao terminal S.....	69
4.3.2 - Efeito dos diferentes tipos de faltas	70
4.3.3 - Efeito da resistência de falta	71
4.3.4 - Efeito da taxa amostral utilizada	72
4.3.5 - Efeito de diferentes capacidades de curto circuito nas fontes	75
4.3.6 - Efeito do comprimento da linha de transmissão	75
 5 - CONCLUSÃO	 78
5.1 - Considerações sobre o algoritmo baseado em dados de um terminal da linha	 78
5.2 - Considerações sobre o algoritmo baseado em dados provenientes dos dois terminais da linha de transmissão.....	 80
5.3 - Considerações finais	82
 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -Esquema completo para um localizador de faltas

Figura 2.1 - Diagrama unifilar para uma linha de transmissão sob falta

Figura 3.1 - Algoritmo de localização de faltas com dados provenientes de um terminal

Figura 3.2 - Resposta em frequência para o filtro TDF utilizado no texto

Figura 3.3(a) - Linha de transmissão SR sob falta

Figura 3.3(b) - Linha de transmissão SR pré-falta

Figura 3.3(c) - Linha de transmissão SR com a falta isolada

Figura 3.4 - Visualização do Método Newton-Raphson

Figura 3.5 - Algoritmo de localização de faltas com dados provenientes dos dois terminais da linha de transmissão

Figura 3.6 - Linha com dois terminais com falta no ponto F

Figura 4.1 - Modelo de linha de transmissão utilizada para testes

Figura 4.2 - Ondas típicas de corrente e tensão para uma falta fase-fase-terra com um ciclo de dados pré-falta (ponto de falta $\cong$ amostra nº 68) e resistência de falta nula

Figura 4.3 - Um ciclo de uma onda de corrente ruidosa (fase c) e sua componente fundamental extraída pela TDF para uma falta ACT a 120 km de S com resistência de falta nula

Figura 4.4 - Onda de tensão faltosa (fase c) com componente fundamental para uma falta ACT a 120 km de S com resistência de falta nula

Figura 4.5 - Gráficos dos parâmetros I''_{sa} , I''_{sb} , I''_{sc} e I''_{s0} para uma falta à 30 km do terminal S com $R_f = 10$ ohms

Figura 4.6 - Processo iterativo de solução de uma falta AT a 122 Km do terminal local S

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Constantes de linha para o modelo de sistema utilizado para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.2 - Efeito do tipo de falta para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.3 - Efeito de resistência de falta de 30 ohms para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.4 - Efeito de resistência de falta de 10 ohms para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.5 - Efeito da taxa amostral de 1 kHz para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.6 - Efeito da taxa amostral de 2 kHz para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.7 - Efeito da capacidade da fonte para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.8 - Efeito da linha com 100 km para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.9 - Efeito da linha com 400 km para o algoritmo com dados de um único terminal

Tabela 4.10 - Matriz impedância série da linha, para o modelo utilizado

para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.11 - Efeito do tipo de falta para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.12 - Efeito de resistência de falta de 30 ohms para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.13 - Efeito de resistência de falta de 10 ohms para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.14 - Efeito da taxa amostral de 1 kHz para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.15 - Efeito da taxa amostral de 2 kHz para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.16 - Efeito de capacidades diferentes das fontes para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.17 - Efeito da linha com 100 km para o algoritmo com dados dos dois terminais

Tabela 4.18 - Efeito da linha com 400 km para o algoritmo com dados dos dois terminais

PRINCIPAIS SÍMBOLOS

V_F, I_F	tensão e corrente no ponto de falta
V'_S, I'_S	tensão e corrente pós-falta no terminal S
V_S, I_S	tensão e corrente pré-falta no terminal S
V''_S, I''_S	componentes superpostos de tensão e corrente em S
I''_{SF}	componente superposto da corrente de falta do terminal S ao ponto F
V'_R, I'_R	tensão e corrente pós-falta no terminal R
V_R, I_R	tensão e corrente pré-falta no terminal R
V''_R, I''_R	componentes superpostos de tensão e corrente em R
p	distância da falta em porcentagem da extensão da linha
$Z_L = R_F + jX_L$	impedância da linha de transmissão por unidade de comprimento
$Z_{LS} = R_{LS} + jX_{LS}$ $= pZ_L$	impedância da linha entre a falta e o terminal S
L	comprimento da linha de transmissão
Z_0	impedância característica
Z_S, Z_R	impedâncias das fontes dos terminais local e remoto
a, b, c	fases da linha
$1, 2, 3$	índices modais
Γ, Γ_k	constantes de propagações de fase e modal
d	distância ao ponto de falta
$A(d), B(d),$ $C(d), D(d)$	constantes dos terminais de uma linha com dois terminais
$[Q], [S]$	matrizes de transformação modal
R_F	resistência de falta
λ	constante de propagação da linha
X_S	reatância no terminal S
Z_C	impedância característica da linha

Z_{abc}	matriz impedância série da linha trifásica por unidade de comprimento
-----------	---

OPERADORES

j	$\sqrt{-1}$
$\text{Re}[\cdot]$	parte real de uma variável complexa
$\text{Im}[\cdot]$	parte imaginária de uma variável complexa

ABREVIATURAS

TP	transformador de potencial
TC	transformador de corrente
EHV	“extra high voltage” - tensão extra alta
TDF	Transformada Discreta de Fourier
CC	curto circuito

TIPOS DE FALTA

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 trifásica

RESUMO

Localizadores de faltas são dispositivos designados para determinar a localização do ponto de incidência de faltas em linhas de transmissão dos sistemas elétricos de potência. Esta localização possibilita uma restauração mais rápida da operação de um sistema elétrico, contribuindo assim para um alto grau de continuidade no fornecimento de energia.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre duas abordagens distintas para localização digital de faltas. Os métodos se distinguem quanto à natureza dos dados de entrada. Um dos métodos utiliza dados disponíveis apenas em um único terminal, enquanto que o outro, utiliza dados provenientes dos dois terminais da linha de transmissão. As teorias fundamentais de ambas as técnicas são estudadas e simulações computacionais das mesmas são extensivamente testadas utilizando-se dados provenientes de uma simulação das linhas de transmissão sob falta.

Palavras Chaves: Localizadores de Faltas, Linhas de Transmissão, Sistemas de Potência.

ABSTRACT

Fault locators are devices designed to pinpoint the location of the fault on transmission lines of electric power systems. This location allows a fast restoration of the power system operation, contributing to a high level of continuity on power delivery.

This work shows a comparative study between two digital fault locator approaches. The methods differ on the nature of input data. One of the methods uses data available from only one end, while the other uses data from the both ends of the transmission line. The fundamental theories of the two techniques will be studied, and computational simulations are extensively tested with data obtained from simulation of faulted transmission lines.

Key Words: Fault Locators, Transmission Lines,
Power Systems.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - LOCALIZADORES DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO.

Sistemas elétricos de potência devem garantir um fornecimento confiável de energia com o mais alto grau de continuidade possível. Faltas podem ocorrer em qualquer ponto de um sistema elétrico de potência, mais constantemente nas linhas de transmissão aéreas que são as partes mais expostas do sistema. Além disso, devido à sua dimensão e ao ambiente em que se encontram, as linhas são as partes do sistema elétrico que apresentam maior dificuldade para manutenção e monitoramento (SAHA & ERIKSON, 1985).

Um localizador digital de faltas tem por função a determinação do ponto de ocorrência da falta numa linha de transmissão, o que é vital para uma operação confiável e mais econômica do sistema de potência como um todo. Esta prática permite uma diminuição nos serviços de manutenção e uma rápida restauração da operação após a ocorrência de uma falta permanente. Por outro lado, um localizador é também muito útil para estimação de faltas transitórias, que podem causar pontos fracos nos sistemas de distribuição e transmissão, e que resultariam em futuros problemas ou faltas permanentes.

O crescente aumento em complexidade dos sistemas elétricos de potência tem exigido uma considerável melhora dos equipamentos de

controle e proteção. Recentemente, os localizadores de falta se tornaram ainda mais importantes uma vez que ficou mais difícil uma visualização dos danos causados no local da falta, devido à rapidez com que disjuntores e sistemas de proteção modernos atuam em caso de faltas (COURY, 1992).

Durante os últimos 20 anos tem havido grande interesse na proteção de sistemas de potência por computador e no desenvolvimento de localizadores de faltas utilizando microprocessadores. O progresso atual da tecnologia de microprocessadores, aliado ao desenvolvimento obtido na área de “software”, os torna adequados para aplicações em sistemas elétricos de potência, especialmente onde é necessária uma grande precisão, como em localização de faltas. O desempenho dos dispositivos analógicos usados anteriormente não era muito preciso e exigia uma constante manutenção, bem como operadores especializados.

Um localizador digital de faltas pode ser implementado como parte de um relé de proteção digital, como um dispositivo “stand alone” ou como um algoritmo independente usando dados obtidos através de registradores digitais de faltas. Estes localizadores de faltas processam dados registrados digitalmente de modo “off-line”, e por isso não estão sujeitos às restrições de processamento impostas aos relés de proteção, que devem operar em modo “on-line”. Isto permite um aumento na

sofisticação dos algoritmos e, portanto, na precisão relacionada à localização digital de faltas. Isto 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.

1.2 - "HARDWARE" DE UM LOCALIZADOR DIGITAL DE FALTAS

O esquema completo para um localizador de faltas é visto na fig. 1.1. O diagrama representa os vários estágios existentes pelos quais os dados provenientes da linha de transmissão deverão passar antes do processamento do algoritmo de localização de faltas propriamente dito.

FIGURA 1.1 - Esquema completo para um localizador de faltas

As ondas de tensão e corrente do sistema primário passam por TC's e TP's para permitir uma redução na sua magnitude. Dentro de certos limites, esses dispositivos reproduzem fielmente a tensão e a corrente em seu sistema secundário.

Os registradores digitais de faltas atuais oferecem benefícios significativos em desempenho para obtenção destas ondas, não só por apresentar a informação de uma forma mais conveniente, mas também por oferecer a possibilidade de utilização dessas informações para processamentos futuros, uma vez que os dados permanecem gravados.

Os registradores são compostos de módulos de "interface", que incluem ^{antecedentes} filtros passa-baixa e transformadores de entrada; "sample e holder" e multiplexador; e conversor analógico-digital. A função do "sample e holder" e multiplexador é de permitir que os seis sinais analógicos de entrada sejam processados por somente um conversor analógico-digital (AGGARWALL et al., 1993).

Após a gravação dos dados pelos registradores, os mesmos são enviados para o microcomputador onde se dará o processamento do algoritmo de localização.

1.3 - "SOFTWARE" PARA UM LOCALIZADOR DIGITAL DE FALTAS

O projeto de localizadores de falta baseados em microprocessadores inclui a seleção de algoritmos adequados para a implementação da técnica escolhida. Diversas abordagens foram

desenvolvidas e diferentes princípios já foram aplicados ao problema da localização de faltas em linhas de transmissão.

Alguns dos princípios são definidos por técnicas baseadas na obtenção de dados de tensão e corrente no momento de ocorrência da falta, através de registradores digitais de falta instalados próximos aos relés da linha de transmissão, como citado anteriormente. Essas técnicas podem ser classificadas de acordo com o modo de obtenção dos dados em técnicas para dados provenientes de um único terminal e para dados provenientes de dois terminais da linha de transmissão.

As técnicas de localização de faltas que usam as frequências fundamentais de tensão e corrente medidas em apenas um dos terminais da linha geralmente apresentam um comprometimento quanto à precisão, em contrapartida à simplicidade para a obtenção de dados. As estimações das localizações das faltas são particularmente propensas a imprecisões se houver contribuições à corrente de falta pelas fontes conectadas a ambos os terminais da linha, especialmente na presença de resistência de falta.

Quando são utilizados dados dos dois terminais torna-se possível superar alguns problemas comuns associados com a localização de faltas. Apesar destas técnicas precisarem de um meio de comunicação para transmissão de dados para o terminal onde será realizado o

processamento, essas necessidades de comunicação são bastante simples (e descontínuas), uma vez que o algoritmo opera em modo "off-line".

1.4 - OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a realização de um estudo comparativo entre as duas técnicas de localização de faltas baseadas na obtenção de dados nos terminais da linha, citadas acima. Serão implementados dois algoritmos, sendo um baseado em dados de apenas um terminal e o outro baseado em dados dos dois terminais da linha de transmissão. Os algoritmos serão testados para dados obtidos de um "software" de simulação de um sistema elétrico de potência em condição faltosa. Maiores detalhes sobre este programa simulador poderão ser vistos no capítulo 4. As situações e configurações simuladas serão iguais para as duas técnicas desenvolvidas e um estudo crítico das vantagens e desvantagens de ambos os métodos será feito.

1.5 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.

O restante do trabalho se encontra dividido da seguinte maneira:

- O capítulo 2 realiza um estudo do estado da arte. Uma revisão bibliográfica é apresentada com trabalhos e metodologias significativas já feitas sobre o assunto.

- No capítulo 3 serão descritos dois métodos de localização de faltas. Ambos os métodos serão apresentados desde a obtenção dos dados utilizados até as rotinas de determinação da distância da falta. Também serão mostradas técnicas para detecção da amostra faltosa, de filtragem, de classificação do tipo de falta, de sincronização, entre outras.
- Os resultados obtidos pelos dois algoritmos de localização e a discussão dos mesmos serão abordados no capítulo 4. Neste capítulo também serão feitas algumas considerações sobre a eficácia dos métodos desenvolvidos.
- O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, destacando vantagens e desvantagens de cada técnica, estabelecendo uma relação entre ambas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

A utilização de dispositivos baseados em microprocessadores tem atraído grande interesse de pesquisadores atualmente, com intuito de aumentar a precisão para a localização de faltas em sistemas de potência. Um considerável esforço tem sido feito para o desenvolvimento de técnicas digitais de localização de faltas em linhas de transmissão de alta tensão. As técnicas revistas aqui são divididas em dois grupos: algoritmos baseados em informações provenientes de apenas um terminal e algoritmos baseados em informações provenientes de ambos os terminais da linha de transmissão.

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 princípios em que se baseiam algumas das técnicas de localização de faltas mostradas neste capítulo. As equações existentes não serão estendidas para sistemas trifásicos, já que o objetivo aqui é somente apresentar as idéias fundamentais.

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

2.2 - ALGORITMOS QUE UTILIZAM DADOS DE UM TERMINAL DA LINHA

Algoritmos que fazem uso de dados de apenas um dos terminais da linha de transmissão são geralmente baseados no cálculo da impedância (ou mais precisamente reatância) em relação ao ponto de falta e a partir deste cálculo a distância da falta pode ser deduzida. Entretanto, estas técnicas geralmente estão sujeitas a erros devido à contribuição proveniente das fontes conectadas em ambos os terminais da linha com relação a corrente de falta e também devido à resistência de falta.

SAINT & PAITHANKAR (1979) propuseram uma técnica de localização de faltas baseada no cálculo da razão entre a reatância de falta da linha (a partir do terminal onde se encontra o localizador de faltas até o ponto de ocorrência da falta), e a reatância total da linha, ou seja, X_{LS}/X_n . Como X_n é um valor conhecido, a razão X_{LS}/X_n determina a posição da falta. Do cálculo dessa razão pode ser derivada a seguinte expressão:

$$\frac{X_{LS}}{X_n} = \frac{\text{sen } \theta_3 \cos \theta_1}{\text{sen } \theta_2} \quad (2.1)$$

onde:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \arctg\left[\frac{I'_s X_n}{V'_s}\right] \\ \theta_2 &= -\frac{V'_s}{I'_s X_n - V'_s} \\ \theta_3 &= 180^\circ - (\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

A eq. (2.1) denota que a posição da falta pode ser determinada pela medida de dois quaisquer dos três ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 . A técnica proposta é baseada na medição destes ângulos por dois contadores digitais. O localizador de faltas é analisado somente sob condições de contribuição de fonte conectada em um único terminal. As estimativas da localização da falta não são precisas se existe uma contribuição à corrente de falta pelas fontes conectadas em ambos terminais da linha e se for levada em conta a resistência de falta.

TAKAGI et al. (1982) apresentaram uma técnica com redução dos erros causados por vários fatores como fluxo de carga, resistência de falta, e disposição não-simétrica das linhas de transmissão. O método para o cálculo da distância até o ponto de falta é baseado nas seguintes equações, as quais expressam a tensão V'_F e a corrente I'_{SF} no ponto de falta, através da teoria de quadripólos, usando dados de um terminal:

$$\begin{aligned} V'_F &= V'_s \cosh(\Gamma d) - Z_0 I'_s \sinh(\Gamma d) \\ I'_{SF} &= (V'_s / Z_0) \sinh(\Gamma d) - I'_s \cosh(\Gamma d) \end{aligned} \quad (2.3 \text{ e } 2.4)$$

Através de algumas aproximações, a distância d pode ser obtida com a seguinte expressão:

$$d = \frac{\text{Im}[V'_s I_s^*]}{\text{Im}[Z_L I'_s I_s^*]} \quad (2.5)$$

Pela eq. (2.5), o efeito do fluxo de carga é anulado através do uso da componente da corrente de falta I_s^* , e o efeito da resistência de falta é reduzido pela manipulação das equações anteriores. A técnica inicialmente despreza o efeito da capacitância em paralelo, mas este efeito é compensado posteriormente.

Um localizador de faltas foi implementado comercialmente pela Toshiba Corporation (*MURUOKA et al.*, 1984) fazendo uso

basicamente dos mesmos princípios descritos acima. Os testes de campo mostraram boa precisão para faltas fase-terra em linhas de transmissão. O método apresenta alguns melhoramentos, mas assume que os ângulos de impedância da linha até, e além da falta, são os mesmos. Essa suposição simplificadora pode levar a erros substanciais no cálculo da distância da falta, visto que a diferença entre os dois argumentos mencionados geralmente varia de acordo com a distância da falta. *SCHWEITZER* (1982) apresentou uma modificação que acrescenta um melhoramento no desempenho para o algoritmo de Takagi.

WISZNIEWSKI (1983) propôs um método baseado nos cálculos padrões de resistências e reatâncias usando um “fator distribuição da corrente de falta”, com um algoritmo que se esforça para compensar o erro introduzido pelo efeito da resistência de falta. Os cálculos requeridos não são iterativos.

A primeira expressão, que leva em consideração o “fator distribuição da corrente”, é:

$$Z_S = Z_{LS} + (R_F / K) \left[\frac{I'_s - I_L}{I'_s e^{j\alpha}} \right] \quad (2.6)$$

A expressão final para calcular um valor correto da reatância é obtida como:

$$X_{LS} = X_S - \frac{R_S \operatorname{tg}(\Phi_L) - X_S}{(a/b) \operatorname{tg} \Phi_L - 1} \quad (2.7)$$

onde

$$a = \operatorname{Re} \left[\frac{I'_S - I_L}{I'_S e^{j\lambda}} \right]$$

$$b = \operatorname{Im} \left[\frac{I'_S - I_L}{I'_S e^{j\lambda}} \right]$$

$$K = ke^{j\lambda}$$

“fator distribuição da corrente de falta”

$$Z_S = R_S + jX_S$$

impedância medida em S

$$\Phi_L = \operatorname{tg}^{-1}(X_{LS}/R_{LS})$$

ângulo de fase da impedância

$$I_L$$

corrente de pré-falta

Os sinais locais V'_S , I'_S e I_L habilitam o cálculo de X_S , R_S , a e b .

Assim, a reatância X_{LS} , a qual é proporcional à distância real entre o terminal de linha S e a falta, pode ser determinada pela eq. (2.7). A precisão na compensação do erro depende dos valores assumidos para Φ_L e λ . De fato, “o fator distribuição da corrente de falta” depende da configuração da rede, ou seja, da impedância da linha entre a falta e os dois terminais e da impedância da fonte em ambos os terminais da

linha. Por simplificação λ é assumido igual a zero, o que implica que o fator distribuição K é real. O ângulo Φ_L também é considerado como constante. Entretanto, em alguns casos, essas suposições podem levar a uma compensação incorreta.

Além disso, o efeito da capacitância em paralelo é ignorado e portanto esta técnica só pode ser justificada para linhas relativamente curtas. De outra forma, a capacitância em paralelo da linha pode se tornar significativa à medida que o comprimento da linha aumenta e isto, por sua vez, pode levar a erros consideráveis para a localização da falta.

SAHA & ERIKSON (1985) também desenvolveram um algoritmo baseado no “fator distribuição da corrente”. O algoritmo do localizador de falta faz uso de valores representativos das impedâncias das fontes a fim de determinar uma descrição correta da rede.

Usando uma expressão similar à eq. (2.6) com uma representação para o “fator distribuição da corrente”, a expressão final obtida é:

$$p^2 - pK_1 + K_2 - K_3R_F = 0 \quad (2.8)$$

Onde:

$$\begin{aligned}K_1 &= \frac{V'_s}{I'_s Z_L} + 1 + \frac{Z_R}{Z_L} \\K_2 &= \frac{V'_s}{I'_s Z_L} \left[\frac{Z_R}{Z_L} + 1 \right] \\K_3 &= \frac{I'_s}{I'_s Z_L} \left[\frac{Z_S + Z_R}{Z_L} + 1 \right]\end{aligned}$$

Através da separação da eq. complexa (2.8) em suas partes real e imaginária, são obtidas duas equações simultâneas. A eliminação da resistência de falta R_F , que é desconhecida, resulta em uma expressão simples com a variável desconhecida p . Isto é solucionado usando-se os módulos e ângulos de fase através de uma rotina baseada na análise de Fourier, que produz os componentes fundamentais dos sinais. Para um sistema multifásico, o tipo de falta deve ser determinado antes de se usar o método.

COOK (1986) apresentou uma outra abordagem lidando com o “fator distribuição da corrente”. A técnica requer que se assuma um valor para a impedância da fonte no terminal remoto, que é usado para determinar o ângulo do fator distribuição, ao invés de seu módulo. Segundo o autor, são apresentados erros menores com o uso desta técnica. O efeito da capacitância paralela é desprezado.

RANJBAR et al. (1992) apresentaram uma técnica baseada em modelos de linha de transmissão de parâmetros distribuídos que leva em consideração o efeito da capacitância da linha. A abordagem utilizada baseia-se no cálculo da tensão ao longo da linha de transmissão. No ponto de falta, a tensão assume seu valor mínimo e, assim, uma comparação dos valores das tensões em diferentes pontos da linha fornece uma base para a localização da falta. Para isso os autores desenvolveram uma função $G(x)$, proporcional à integral do valor absoluto da tensão sobre um intervalo de tempo limitado. Esta função, por sua vez, faz uso das ondas de tensão ao longo da linha calculadas por meio de equações telegráficas. $G(x)$ é calculada para diversos pontos sobre a linha e possui seu valor mínimo no local de ocorrência da falta.

O método determina a localização mesmo para uma falta com ângulo de incidência igual à zero. O erro máximo atingido foi menor que $D_x/2$, onde D_x é a distância entre dois pontos consecutivos da linha de transmissão, sobre os quais são calculados valores para a função $G(x)$. O método faz uso da teoria modal para transformação das equações aplicadas à faltas não simétricas.

Outro método para localização de faltas usando dados de um único terminal foi apresentado por *RICHARDS & TAN* (1982). A linha é representada como um circuito de parâmetros concentrados. O problema de localização da falta é tratado como um problema de estimação de parâmetros de um sistema dinâmico, no qual a resposta ao sistema físico é comparada ao modelo de parâmetros concentrados. Os parâmetros do modelo são variados até que uma combinação adequada é obtida com a resposta física do sistema. Simplificações das equações são alcançadas com o uso de componentes simétricos. Esta estimação não requer filtragens do componente CC e componentes de altas frequências.

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

WESTLIN & BUBENKO (1976) apresentaram um método iterativo para a localização de faltas em linhas de transmissão. O método considera a influência do terminal remoto definindo um

modelo abstrato para o mesmo e, a partir deste modelo, gera um conjunto de equações não-lineares para cada tipo de falta. Essas equações são então solucionadas usando-se a técnica de Newton-Raphson, sendo que os dados de entrada são os valores de fase da tensão e corrente do terminal local.

Este método possui a desvantagem de necessitar que as impedâncias da fonte no terminal remoto sejam conhecidas.

2.3 - ALGORITMOS QUE UTILIZAM DADOS DOS DOIS TERMINAIS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Alguns autores pregam que melhorias na precisão em algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão são alcançadas fazendo-se uso 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 sistemas 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) propuseram uma técnica usando corrente e tensão em regime permanente provenientes dos dois terminais da linha. Uma primeira abordagem é usada para um modelo de linha curta. A tensão no ponto F, usando dados do barramento S (fig. 2.1) é:

$$V'_F = V'_S - pZ_L I'_S \quad (2.9)$$

e a tensão no ponto de falta usando dados do barramento R é:

$$V'_F = V'_R - (1-p) Z_L I'_R \quad (2.10)$$

Equacionando-as de modo a eliminar V'_F , obtém-se o resultado:

$$p = [(V'_S - V'_R) + Z_L I'_R] / [Z_L (I'_S + I'_R)] \quad (2.11)$$

A eq. (2.11) 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 os terminais da linha são as mesmas sob condições normais (sem a ocorrência de faltas). Isto produz a condição para pré-falta:

$$I'_R = -I'_S \quad (2.12)$$

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. (2.9) e (2.10) são substituídas por:

$$V'_F = V'_S \cosh(\Gamma pL) - Z_0 I'_S \sinh(\Gamma pL) \quad (2.13)$$

$$V'_F = V'_R \cosh[\Gamma(1-p)L] - Z_0 I'_R \sinh[\Gamma(1-p)L] \quad (2.14)$$

A solução obtida para a localização, usando as equações acima e aproximações de primeira ordem para as exponenciais das funções hiperbólicas, fica:

$$p = \frac{[(V'_S - V'_R) - Z_0 \Gamma L I'_R]}{[Z_0 \Gamma L (I'_S + I'_R) - (V'_S - V'_R)(\Gamma L) - (V'_R + Z_0 I'_R)(\Gamma L)^2]} \quad (2.15)$$

onde $Z_0 \Gamma L = Z_L$.

Uma estimativa da corrente de pré-falta I'_R no barramento S é necessária para sincronização dos “clocks”. Usando as mesmas aproximações, a estimativa é:

$$I'_{RS} = V'_S [\Gamma L / Z_0] - I'_S \quad (2.16)$$

onde I'_{RS} denota uma estimativa para a corrente do barramento R no barramento S.

O método para dois terminais descrito acima não requer valores para os parâmetros do sistema externos à linha de transmissão monitorada. Não são apresentados resultados com referência a nenhuma das técnicas mencionadas 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. (2.11) para estimar a localização para uma falta em linha 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. (2.11) despreza a capacitância em paralelo nas linhas de transmissão. Para linhas EHV longas, onde correntes de carga são substanciais, os autores afirmam que o método resultará em uma estimação 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 & JAMALI (1989) usaram as eq. (2.13) e (2.14) para uma avaliação exata da distância à falta. O método envolve monitoramento e filtragem das tensões e correntes medidas em cada terminal da linha, de maneira a produzir uma medida dos fasores de tensão e corrente fundamentais em regime permanente. A distância é então calculada pela teoria de modos naturais e teoria de função matricial. Em todos os casos testados, o erro produzido pelo algoritmo é menor que 1,5%.

SACHDEV & AGARWALL (1985) propuseram uma abordagem na qual é feito uso da impedância aparente local da linha e corrente de sequência positiva medida localmente por relés e também para os dados correspondentes no terminal remoto. A partir destas informações, diferentes tipos de faltas foram analisadas 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 apenas 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 falta 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) propôs dois métodos utilizando informações disponíveis nos terminais local e remoto. O primeiro método requer apenas a impedância medida em cada terminal de linha e gera uma equação quadrática envolvendo o parâmetro distância desconhecido. O segundo método necessita de duas impedâncias e duas correntes dos relés, sendo similar ao método proposto por Sachdev e Agarwall.

Estes métodos são precisos de uma maneira geral, 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 componentes seqüenciais sejam usados.

GIRGIS & FALLON (1992) desenvolveram dois métodos de localização 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 solucionado através de um processo de solução iterativo. Este método independe do tipo de falta e não é afetado pela resistência de falta.

3 - LOCALIZADORES DE FALTAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO

3.1 - INTRODUÇÃO

Algoritmos para proteção de linhas de transmissão utilizam estimativas da localização da falta para tomadas de decisões (PHADKE & THORP, 1988). Estas estimativas são precisas apenas o suficiente para determinar se a falta está em uma das zonas de proteção do relé. Diferentemente, para inspeção, manutenção e reparo da falta, estas estimativas da localização de faltas devem ser as mais precisas possíveis. Para uma linha de transmissão longa, por exemplo, um erro de poucos quilômetros na estimação da localização da falta é aceitável para uma decisão de proteção, mas pode representar uma longa caminhada até o ponto de falta para os operadores encarregados do reparo da linha, às vezes em terreno bastante acidentado. Apesar da existência de técnicas analógicas de localização de faltas, com o desenvolvimento de técnicas digitais para este fim, tem sido possível conseguir uma altíssima precisão na localização de faltas em sistemas elétricos.

O objetivo deste trabalho é a elaboração de subrotinas que lidem com os dados de entrada de uma linha, desde sua obtenção

junto aos registradores instalados nas subestações, até o momento de aplicação dos algoritmos localizadores propriamente ditos. As subrotinas implementadas para este fim são de fundamental importância, pois quando da gravação, os dados não estão representados de uma forma adequada para sua utilização imediata pelos localizadores. As subrotinas incluem métodos de filtragem, de estimação dos instantes de ocorrência da falta, de sincronização, de classificação do tipo de falta, etc.

As subrotinas apresentadas aqui foram implementadas passo a passo, através de computadores digitais. Foi utilizada uma linguagem de programação científica, linguagem C, bem como estruturas de dados e ferramentas computacionais necessárias a este desenvolvimento. Para a obtenção dos dados de entrada foi empregado um pacote de simulação de sistemas elétricos de potência, o qual será descrito no próximo capítulo. Os algoritmos de localização escolhidos foram implementados baseando-se em metodologias existentes na bibliografia, sendo que os mesmos foram adaptados aos casos de estudo sugeridos.

A seguir serão descritas as metodologias desenvolvidas, sendo uma baseada em dados provenientes de um único terminal, e a outra utilizando dados dos dois terminais da linha de transmissão.

3.2 - LOCALIZADOR DE FALTAS COM DADOS PROVENIENTES DE UM ÚNICO TERMINAL DA LINHA

Este tópico descreve a implementação prática de um algoritmo para uma localização precisa de faltas baseado no método de Newton-Raphson para uma linha de transmissão EHV. O algoritmo possibilita uma estimação precisa da localização da falta, utilizando apenas dados disponíveis localmente. A técnica é bastante adequada para utilização com processadores digitais, uma vez que necessita de vários cálculos numéricos.

O método faz uso das ondas de tensão e corrente apenas de um terminal EHV local, os quais são posteriormente filtrados através da técnica TDF (Transformada Discreta de Fourier) a fim de obter uma medida dos fasores de corrente e tensão em regime permanente. A técnica também utiliza componentes superpostos e modais de tensão e corrente, ao invés de valores totais (de fase) para o cálculo da distância da falta. É também apresentada uma técnica para classificação do tipo de falta ocorrida.

Os vários estágios presentes na técnica são mostrados na fig.

3.1. O ponto inicial é a obtenção dos dados digitalizados de tensão e corrente do terminal local onde os procedimentos terão lugar.

FIGURA 3.1 - Algoritmo de localização de faltas com dados provenientes de um terminal

Como pode ser visto na fig. 3.1, os passos seguintes envolvidos no processo são: detecção da falta, obtenção dos componentes superpostos, extração dos fasores fundamentais, classificação da falta, transformação modal e, por fim, o método de solução dos equacionamentos que estipula a distância da falta. Estes passos serão decritos a seguir.

3.2.1 - DETECÇÃO DA FALTA

As amostras usadas pelo método - provenientes de um registrador digital de faltas - normalmente incluem dados de pré-falta e pós-falta. Portanto, é necessário que se determine o ponto amostral onde a falta tem início de modo a se obterem dois conjuntos de dados: um formado por um ciclo de valores pré-falta e outro por um ciclo de valores pós-falta.

Faltas causam distorções nas ondas de corrente e tensão e fazem com que seus valores de pico variem em magnitude e/ou ângulo de fase com relação às condições encontradas antes da ocorrência da falta. O processo de detecção compara as amostras das três fases da linha simultaneamente com as amostras correspondentes, um ciclo anterior. Uma mudança significativa (cerca de 5% do valor de pico) nas magnitudes das amostras entre os dois casos indica que ocorreu uma falta. Para uma garantia maior, espera-se uma confirmação da mudança para as duas próximas comparações, isto é,

três amostras seguidas com mudanças na magnitude determinam o ponto amostral de ocorrência da falta.

3.2.2 - EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS

Os valores de corrente e tensão das ondas pós-falta podem apresentar transitórios variando de altas frequências até componentes CC. Logo, torna-se importante a extração precisa dos fasores fundamentais destas ondas de modo a se obter um alto grau de confiabilidade na localização da falta. Embora os transitórios das ondas dos sistemas primários sejam atenuados por transdutores e filtros passa-baixa, estas ondas ainda podem ser registradas com um conteúdo harmônico e componente CC significativos, antes de serem processadas pelo algoritmo localizador. Isto leva à uma necessidade de emprego de técnicas especiais de filtragem digital.

O método escolhido é a Transformada Discreta de Fourier (OPPENHEIM & SCHAFER, 1975) para um ciclo completo de dados, que produz a magnitude e o ângulo de fase do fasor fundamental $X_{v,i}(\omega)$ para 60 Hz, com sua equação geral dada por:

$$X_{v,i}(\omega) = (2 / N) \sum_{n=0}^{n=N-1} [X_{v,i}(n) \{ \cos(\omega n \Delta t) - j \sin(\omega n \Delta t) \}] \quad (3.1)$$

Onde:

N = número de amostras por ciclo

Δt = intervalo de tempo entre as amostras

$\omega = 2\pi 60$ frequência angular em Hz do fasor extraído

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

Os fasores trifásicos fundamentais de tensão e corrente pós-falta podem ser determinados no terminal local S, de uma linha SR, como:

$$V'_{Sa} = X_{Vsa}(\omega) \quad (3.2)$$

$$V'_{Sb} = X_{Vsb}(\omega) \quad (3.3)$$

$$V'_{Sc} = X_{Vsc}(\omega) \quad (3.4)$$

$$I'_{Sa} = X_{Isa}(\omega) \quad (3.5)$$

$$I'_{Sb} = X_{Isb}(\omega) \quad (3.6)$$

$$I'_{Sc} = X_{Isc}(\omega) \quad (3.7)$$

onde

V'_{Si} = fasor de tensão pós-falta da fase i em S

I'_{Si} = fasor de corrente pós-falta da fase i em S

p/ i= a,b,c

Estudos realizados demonstraram que a técnica TDF vista acima é bastante eficaz para a rejeição de componentes de alta frequência e providencia uma boa filtragem dos componentes de baixa frequência, em particular o componente CC. A TDF mostrou ser compatível com qualquer taxa amostral, servindo para análise em qualquer registrador. A fig. 3.2 mostra a resposta em frequência de um filtro TDF a uma onda senoidal normalizada.

FIGURA 3.2 - Resposta em frequência para o filtro TDF utilizado

3.2.3 - OBTENÇÃO DOS COMPONENTES SUPERPOSTOS

Uma ocorrência de falta em uma linha de transmissão pode ser considerada como sendo equivalente à superposição da tensão no ponto de falta, a qual é igual e oposta à tensão pré-falta em regime permanente. As componentes de tensão e corrente pós-falta podem ser

então consideradas como compostas por componentes pré-falta em regime permanente e componentes introduzidas pela falta., do seguinte modo:

$$V'_S = V_S + \Delta V_F \quad (3.8)$$

$$I'_S = I_S + \Delta I_F \quad (3.9)$$

Os componentes superpostos ΔV_F e ΔI_F representam a diferença entre os valores de pós-falta e os valores de pré-falta em regime permanente (AGGARWALL et al.,1993).

Assim, a diferença entre os fasores no terminal emissor S é dada por:

$$V''_{Sa} = V'_{Sa} - V_{sa} \quad (3.10)$$

$$V''_{Sb} = V'_{Sb} - V_{sb} \quad (3.11)$$

$$V''_{Sc} = V'_{Sc} - V_{sc} \quad (3.12)$$

$$I''_{Sa} = I'_{Sa} - I_{sa} \quad (3.13)$$

$$I''_{Sb} = I'_{Sb} - I_{sb} \quad (3.14)$$

$$I''_{Sc} = I'_{Sc} - I_{sc} \quad (3.15)$$

onde V''_{Si} = componente superposto da tensão da fase i em S

e I''_{Si} = componente superposto da corrente da fase i em S

p/ i= a,b,c

A utilização de componentes superpostos, ao invés de valores totais providencia uma precisão adicional pelo fato de que erros causados pela carga de pré-falta são virtualmente eliminados.

3.2.4 - CLASSIFICAÇÃO DA FALTA

O algoritmo de classificação da falta foi incorporado como um dispositivo opcional que permite facilitar a restauração e manutenção da linha, pela identificação do tipo de falta e das fases envolvidas. Esta informação será também utilizada pelo algoritmo de localização.

A técnica de localização desenvolvida necessita que se determine se a falta envolve terra ou não, a fim de se escolher uma das duas equações disponíveis (conforme será visto adiante). Na prática, o monitoramento da magnitude da corrente de sequência zero permite essa identificação, uma vez que a magnitude cresce, para faltas envolvendo terra.

O método de classificação da falta quanto ao tipo realiza uma comparação entre os fasores de corrente superpostos e de sequência zero fundamental I''_{Sa} , I''_{Sb} , I''_{Sc} e I''_{S0} do terminal local S, e é resumido a seguir:

SE**FALTA TIPO**

$$\bullet I''_{Sb} < KI''_{Sa} \text{ e } I''_{Sc} < KI''_{Sa}$$

fase-a terra

$$\bullet I''_{Sa} < KI''_{Sb} \text{ e } I''_{Sc} < KI''_{Sb}$$

fase-b terra

$$\bullet I''_{Sa} < KI''_{Sc} \text{ e } I''_{Sb} < KI''_{Sc}$$

fase-c terra

$$\bullet I''_{Sc} < KI''_{Sa} \text{ e } I''_{Sb} \cong I''_{Sa} \text{ e}$$

$$- I''_{S0} > I_{\min}$$

fase-a-b terra

- caso contrário

fase-a-b

$$\bullet I''_{Sa} < KI''_{Sb} \text{ e } I''_{Sc} \cong I''_{Sb} \text{ e}$$

$$- I''_{S0} > I_{\min}$$

fase-b-c terra

- caso contrário

fase-b-c

$$\bullet I''_{Sb} < KI''_{Sa} \text{ e } I''_{Sa} \cong I''_{Sc} \text{ e}$$

$$- I''_{S0} > I_{\min}$$

fase-a-c terra

- caso contrário

fase-a-c

$$\bullet I''_{Sa} \cong I''_{Sb} \cong I''_{Sc}$$

fase-a-b-c

O parâmetro K é a razão entre as correntes de fase sem falta e faltosa. Este parâmetro depende da configuração do sistema e pode ser determinado empiricamente.

Na prática é necessário também aplicar uma constante limite $I_{\min}$ para as medidas, devido à existência de linhas não balanceadas, transdutores, erros na filtragem, etc.

3.2.5 - TRANSFORMAÇÃO MODAL

Como mencionado anteriormente, o método de localização de faltas com dados de um terminal faz uso de componentes modais de tensão e corrente ao invés de valores totais. Isto 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. Os valores de fase são transformados em três modos desacoplados: um modo Terra e dois modos Aéreos, através da teoria dos modos naturais (WEDEPHOL,1963).

Um parâmetro distribuído de uma linha de transmissão trifásica pode ser descrito no domínio da frequência através das equações diferenciais:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = [Z][Y]V \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial X^2} = [Y][Z]I \quad (3.17)$$

Introduzindo a teoria dos modos naturais, as variações de fase são transformadas em:

$$V = [Q] V_m \quad (3.18)$$

$$I = [S] I_m \quad (3.19)$$

onde V = valores trifásicos de tensão

I = valores trifásicos de corrente

V_m = vetores modais de tensão

I_m = vetores modais de corrente

Q = matriz de transformação modal para tensão

S = matriz de transformação modal para corrente

e as equações da linha ficam:

$$\frac{\partial^2 V_m}{\partial X^2} = [Q^{-1}][Z][Y][Q]V_m \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial^2 I_m}{\partial X^2} = [S^{-1}][Y][Z][S]I_m \quad (3.21)$$

Os modos desacoplados acima são obtidos pela escolha das matrizes de transformação apropriadas $[Q]$ e $[S]$ para diagonalizar $[Q^{-1}][Z][Y][Q]$ e $[S^{-1}][Y][Z][S]$. Para uma sistema não balanceado, as matrizes de transformação $[Q]$ e $[S]$ são diferentes, mas, se for assumida uma transposição perfeita, então elas serão idênticas e, pela transformação de Clerk, serão dadas por:

$$[Q] = [S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

A abordagem adotada aqui assume essa transposição, e as equações abaixo mostram a transformação modal para as tensões e correntes, usando $[Q^{-1}]$ e $[S^{-1}]$, no terminal local S:

$$V''_{s1} = [Q^{-1}] [V''_{sa}] \quad (3.23)$$

$$V''_{s2} = [Q^{-1}] [V''_{sb}] \quad (3.24)$$

$$V''_{s3} = [Q^{-1}] [V''_{sc}] \quad (3.25)$$

$$I''_{s1} = [Q^{-1}] [I''_{sa}] \quad (3.26)$$

$$I''_{s2} = [Q^{-1}] [I''_{sb}] \quad (3.27)$$

$$I''_{s3} = [Q^{-1}] [I''_{sc}] \quad (3.28)$$

com $1,2,3 = \text{índices modais}$

e $a,b,c = \text{índices de fase}$

3.2.6 - TEORIA FUNDAMENTAL E EQUACIONAMENTOS DO LOCALIZADOR

A teoria é descrita primeiramente para uma linha monofásica (TAKAGI et al., 1981). Tomamos como exemplo uma falta no ponto F que está distante d km do terminal S da linha de transmissão SR representada na fig. 3.3(a).

FIGURA 3.3(a) - Rede sob falta

Aplicando-se a teoria da superposição em redes lineares, separa-se uma rede faltosa em duas redes derivadas: uma rede pré-falta e uma rede em que a falta foi isolada, representadas respectivamente pelas fig. 3.3(b) e 3.3(c).

FIGURA 3.3(b) - Rede pré-falta

FIGURA 3.3(c) - Rede com a falta isolada

Seja V'_F o vetor de tensão em F, e seja I'_F o vetor de corrente na resistência de falta R_F na rede faltosa. Temos então,

$$\begin{aligned} V'_F &= R_F \cdot I'_F \\ &= -R_F (I''_{FS} + I''_{FR}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

com V'_F = fasor trifásico de tensão pós-falta no ponto F, I''_{FS} igual à corrente da linha de F para S e I''_{FR} igual à corrente de F para R, ambas definidas na rede com a falta isolada.

Uma nova variável $K(d)$ é definida como

$$K(d) \cong \frac{I''_{FR}}{I''_{FS}} \quad (3.30)$$

Pode ser observado que a razão $K(d)$ é uma função da distância d à falta. A substituição da eq. (3.30) na eq. (3.29) produz:

$$V'_F = -R_F I''_{FS} (1 + K(d)) \quad (3.31)$$

V'_F e I''_{FS} podem ser estimados pelos vetores medidos localmente, utilizando a Teoria dos Quadripolos,

$$V'_F = A(d)V'_S - B(d)I'_S \quad (3.32)$$

$$I''_{FS} = C(d)V''_S - D(d)I''_S \quad (3.33)$$

onde $A(d)$, $B(d)$, $C(d)$ e $D(d)$ são as quatro constantes para a porção SF da linha, definidas para um sistema distribuído como:

$$A(d) = D(d) = \cosh(\lambda d) \quad (3.34)$$

$$B(d) = Z_C \sinh(\lambda d) \quad (3.35)$$

$$C(d) = \sinh(\lambda d)/Z_C \quad (3.36)$$

λ é a constante de propagação da linha e Z_C é a impedância característica.

Os vetores faltosos V'_S e I'_S são obtidos diretamente no terminal local S, enquanto que os vetores na rede de falta isolada V''_S

e I''_s são obtidos através da diferença entre os vetores pós-falta e os vetores pré-falta, como descrito anteriormente,

$$V''_s = V'_s - V_s \quad (3.37)$$

$$I''_s = I'_s - I_s \quad (3.38)$$

Portanto, a eq. (3.31) pode ser reescrita apenas com vetores obtidos localmente, como:

$$A(d)V'_s - B(d)I'_s = -R_F\{1+K(d)\}\{C(d)V''_s - D(d)I''_s\} \quad (3.39)$$

o que leva a

$$R_F\{1+K(d)\} = -\frac{A(d)V'_s - B(d)I'_s}{C(d)V''_s - D(d)I''_s} \quad (3.40)$$

Como a impedância de falta é puramente resistiva, isto implica que R_F é uma variável real. A razão $K(d)$ também será real com a condição de que a linha de transmissão seja sem perdas, e as impedâncias das fontes nos dois terminais da linha sejam puramente indutivas (TAKAGI et al.,1981). Tudo isto implica que o lado esquerdo da eq. (3.40) será real. Portanto, o lado direito da eq. (3.40) também deverá ser real para a sentença ser verdadeira.

A equação básica do localizador é então definida como:

$$\text{Im}\left[\frac{A(d)V'_s - B(d)I'_s}{C(d)V''_s - D(d)I''_s}\right] = 0 \quad (3.41)$$

onde $\text{Im}[\cdot]$ representa a parte imaginária de uma variável complexa. A solução d da eq. (3.41) é a distância do ponto da falta ao terminal local. Como a eq. (3.41) não é uma equação linear, é necessária uma técnica de solução iterativa. É utilizada então a técnica Newton-Raphson aplicada ao problema da localização da falta.

A idéia por trás do método Newton-Raphson (HAMMING,1973) consiste em traçar uma reta tangente à curva de uma função f , para um ponto inicial qualquer, verificando o ponto em que essa reta corta o eixo X. O ponto encontrado será a nova aproximação para a função. Uma notação matemática para a reta tangente em x_n (fig. 3.4) é:

$$y(x) = F(x_n) + F'(x_n) (x - x_n) \quad (3.42)$$

FIGURA 3.4 - Visualização do Método Newton-Raphson

e substituindo para $x=x_{n+1}$, a nova aproximação será

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.43)$$

onde: x_n **é a aproximação inicial**

x_{n+1} **é a nova aproximação**

$f(x_n)$ **eq. (3.41)**

$f'(x_n)$ **derivada da eq. (3.41)**

O método converge quando a parte imaginária da eq. (3.41) for zero.

A equação básica obtida contém uma variável d desconhecida, vetores obtidos localmente e parâmetros da linha. Logo, o processo de localização da falta pode ser realizado sem nenhum dado de terminal remoto. Não são necessários canais de comunicação entre os terminais. A equação básica também não inclui a resistência de falta R_F . Isto significa que o algoritmo não necessita do valor da resistência de falta para seus equacionamentos.

As características do localizador de falta para uma linha monofásica são obviamente aplicáveis para uma linha trifásica. A equação básica pode ser estendida para uma linha trifásica diretamente.

Seja $(x)^{(w)}$ uma quantidade modal (p/ x uma variável qualquer). Então para uma falta fase-terra a equação fica,

$$\text{Im}\left[\frac{V_F'^{(1)} + V_F'^{(2)} + V_F'^{(3)}}{C^{(j)}(d)V_s''^{(j)} - D^{(j)}(d)I_s''^{(j)}}\right] = 0 \quad (3.44)$$

$$j=1,2,3$$

e para uma falta fase-fase,

$$\text{Im}\left[\frac{V_F'^{(2)} - V_F'^{(3)}}{C^{(j)}(d)V_s''^{(j)} - D^{(j)}(d)I_s''^{(j)}}\right] = 0 \quad (3.45)$$

$$j=1,2$$

As tensões modais em F são estimadas pela eq. (3.46).

$$V_F'^{(w)} = A^{(w)}(d)V_s'^{(w)} - B^{(w)}(d)I_s'^{(w)} \quad (3.46)$$

$$W=1,2,3$$

Para os testes descritos no próximo capítulo, serão aplicadas as equações (3.44) e (3.45) para a localização de faltas em linhas trifásicas.

3.3 - ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO COM DADOS PROVENIENTES DOS DOIS TERMINAIS DA LINHA

Será descrito agora um algoritmo para localização utilizando dados dos dois terminais da linha de transmissão EHV. O algoritmo baseia-se na computação digital dos fasores fundamentais trifásicos de corrente e tensão à 60 Hz de ambos os terminais. Este algoritmo pretende ser independente do tipo de falta e imune à variações na impedância das fontes e da resistência de falta. O método pode operar em tempo real acompanhando a operação de relés digitais ou também “off-line”, utilizando os dados provenientes de dispositivos registradores de falta. É necessária a existência de um mecanismo de comunicação entre os terminais e um processador.

A abordagem desenvolvida utiliza os fasores fundamentais obtidos de ambos os terminais, com seus valores sincronizados em relação à uma referência de tempo comum. Os dados são enviados para o processador, para posterior cálculo da distância. O método emprega componentes de fase e considera as seções da linha como sendo não transpostas. Não é necessário que se façam estimativas sobre a resistência de falta.

As etapas que compõem este algoritmo podem ser vistas na fig. 3.5. Começa com a obtenção dos dados digitalizados de tensão e corrente dos dois terminais. Os passos seguintes, e que serão vistos com mais detalhes adiante, são: detecção da falta em cada terminal, extração dos

fasores fundamentais, sincronização dos dados, classificação da falta e o método de solução dos equacionamentos deduzidos para a estimação da distância da falta em relação a um dos terminais.

FIGURA 3.5 - Algoritmo de localização de faltas com dados provenientes dos dois terminais da linha de transmissão

3.3.1 - DETECÇÃO DO INSTANTE DE OCORRÊNCIA DA FALTA

Aqui a detecção da falta é utilizada com o mesmo propósito do método utilizando dados de um terminal. As diferenças residem no fato de que são determinados os pontos amostrais de início da falta em cada terminal. São obtidos dois conjuntos com um ciclo de dados pós-falta e dois conjuntos com um ciclo de dados pré-falta relativos a cada terminal. O processo de detecção propriamente dito é o mesmo empregado para o método de um terminal, ou seja, três amostras seguidas com variações com relação aos dados de pré-falta determinam o ponto amostral onde a falta teve início.

3.3.2 - EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS

O processo é idêntico ao descrito na seção 3.2.2, fazendo-se novamente uma ressalva no sentido de que o mesmo é realizado para os dados de cada terminal da linha.

3.3.3 - SINCRONIZAÇÃO DOS DADOS

O algoritmo envolve leitura de dados dos dois terminais da linha de transmissão, o que por sua vez necessita que as quantidades fasoriais estejam relacionadas por uma referência de tempo comum. Uma sincronização dos tempos de medida nos dois terminais pode ser conseguida através de um canal de ligação contínuo entre os terminais, mas esta solução seria muito dispendiosa. Na prática, os dados de pré-

falta de corrente e tensão em um dos terminais podem ser usados para providenciar uma referência comum a fim de relacionar esses dados com os dados do outro terminal. Por exemplo, a tensão pré-falta no terminal local pode ser calculada em função das grandezas do terminal remoto através de equações de linha dada pela eq. (3.47). Esta abordagem elimina a necessidade de sincronização dos dados através de uma linha de comunicação exclusiva.

$$V_S = \cosh(\lambda L)V_R - Z_C \sinh(\lambda L)I_R \quad (3.47)$$

A avaliação da eq. (3.47) fornece o ângulo de fase entre as tensões dos terminais local e remoto para os dados de pré-falta. Este ângulo, por sua vez, é usado para providenciar uma referência de tempo comum a qual relaciona os dados de tensão amostrados em cada terminal. Através dele, uma sincronização perfeita dos dados pode ser obtida.

3.3.4 - CLASSIFICAÇÃO DA FALTA

Novamente incorporamos um algoritmo de classificação do tipo de falta como um dispositivo adicional para ajudar no trabalho de restauração da linha curto-circuitada.

Diferente da técnica baseada em dados de um terminal, o algoritmo implementado para dois terminais não necessita da determinação se a falta envolve terra ou não, pois existe apenas uma

equação para o cálculo final da distância. Logo, o método independe do tipo de falta.

O algoritmo de classificação é o mesmo descrito na seção 3.2.4, sendo aplicado tomando-se como base os dados de corrente de qualquer um dos terminais.

3.3.5 - TEORIA FUNDAMENTAL E EQUACIONAMENTOS DO LOCALIZADOR

Esta seção descreve os princípios da técnica de localização de faltas utilizando fasores de tensão e corrente trifásicos dos dois terminais da linha (GIRGIS et al.,1992). Considerando o sistema descrito pela fig. (3.6).

FIGURA 3.6 - Linha com dois terminais com falta no ponto F

Admitindo-se que os fasores trifásicos de tensão e corrente nos barramentos S e R são obtidos sincronizados, então os vetores trifásicos de tensão nos barramentos S e R podem ser representados em função dos

vetores trifásicos de corrente, como mostrado nas equações (3.48) e (3.49).

$$V'_S = V'_F + d Z_{abc} I'_S \quad (3.48)$$

$$V'_R = V'_F + (L-d) Z_{abc} I'_R \quad (3.49)$$

onde

Z_{abc} = matriz impedância série da linha trifásica

Subtraindo (3.49) de (3.48) fica:

$$V'_S - V'_R + L Z_{abc} I'_R = d Z_{abc} [I'_S + I'_R] \quad (3.50)$$

A eq. (3.50) pode ser reescrita, considerando o sistema trifásico, da forma:

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} d \quad \text{ou} \quad Y = M d \quad (3.51)$$

onde:

$$Y_{sj} = V_{sj}^l - V_{Rj}^l + L \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} I_{Ri}^l \quad (3.52)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} (I_{Si}^l + I_{Ri}^l) \quad (3.53)$$

p/ j=a,b,c

com Z_{ji} = matriz 3x3 da impedância série

A eq. (3.51) representa três equações complexas ou seis equações reais para uma variável, d , que é a distância da falta em relação a um terminal da linha.

A solução para d pode ser obtida empregando-se a equação geral do localizador:

$$d = (M^+ M)^{-1} M^+ Y \quad (3.54)$$

com M^+ = matriz transposta conjugado de M .

Pode ser notado pela eq. (3.54) que este algoritmo independe do tipo de falta e da resistência da falta para seus equacionamentos.

4- TESTES REALIZADOS PARA OS LOCALIZADORES ESTUDADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Para a verificação dos métodos propostos, foi utilizado um modelo de linha de transmissão sob falta para realização de uma série de simulações computacionais. O modelo de linha utilizado pode ser observado na fig. 4.1. Trata-se de uma linha de transmissão trifásica, 400 kV com 200 km de comprimento. Os algoritmos foram testados para uma variedade de condições para a linha configurada, com o objetivo de cobrir grande parte das situações comuns a uma linha de transmissão de alta tensão. Primeiramente, foram testados diferentes tipos de faltas em diversas localizações da linha. Posteriormente, o modelo foi testado com modificações em sua configuração original e condições de falta, tais como: variações na resistência de falta, comprimento total da linha, taxa amostral utilizada e capacidade da fonte local.

FIGURA 4.1 - Modelo de Linha de Transmissão utilizada

Os valores amostrais de tensão e corrente utilizados foram gerados através do pacote computacional de simulação de faltas transitórias em linhas conhecido como TEER (JONHS & AGGARWALL, 1976). Este pacote, desenvolvido na Universidade de Bath (Inglaterra), tem por finalidade a obtenção de dados precisos de tensão e corrente antes e depois da incidência de uma falta para diferentes configurações de linhas de transmissão EHV. Os dados permanecem registrados em arquivos na forma digital para processamentos posteriores.

Para a simulação, o pacote TEER utiliza uma teoria bastante eficiente para analisar o comportamento dos transitórios de falta de uma linha EHV. Os programas são baseados na solução de equações através dos teoremas de Superposição e de Thévenin no domínio da frequência. Com o objetivo de apresentar os dados de uma forma apropriada para uma computação digital, as soluções são transformadas do domínio da frequência para o domínio do tempo, através de técnicas de análise de matrizes em conjunto com a Transformada Inversa de Fourier. As técnicas levam em consideração a disposição física e as características dos condutores, efeito da variação da frequência nos parâmetros da linha, efeitos do tipo de falta, bem como os efeitos causados por capacidades diferentes das fontes.

A fig. 4.2 mostra um exemplo de ondas de tensão e corrente de um sistema sob falta, incluindo dados pré-falta, para uma falta fase-fase-terra

localizada a 50 km do terminal local, com resistência de falta de 0Ω . Estas ondas se referem à linha representada pela fig.4.1.

FIGURA 4.2 - Ondas típicas de corrente e tensão para uma falta fase-fase-terra com um ciclo de dados pré-falta e $R_F=0\Omega$.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, de acordo com os estágios envolvidos nas duas técnicas de localização de falta descritas no Capítulo 3. Para o primeiro algoritmo esses resultados incluem a detecção do instante de ocorrência da falta, a extração dos fasores fundamentais, a

classificação da falta e a solução através do método Newton-Raphson para obtenção da localização. Para o segundo algoritmo, além de etapas comuns ao outro método, os resultados incluem a sincronização dos dados, e também as estimações obtidas para a localização com este método. Serão apresentados somente os casos mais significativos dos testes realizados. A maior parte dos testes foi realizada a uma taxa amostral de 4 kHz. Taxas amostrais de 2 kHz e 1 kHz também foram investigadas.

4.2 - TESTES DA TÉCNICA BASEADA EM DADOS PROVENIENTES DE UM ÚNICO TERMINAL

Os testes descritos a seguir foram realizados a partir de dados gerados pelo pacote TEER, e se referem ao sistema configurado na fig. 4.1.

As constantes de linha utilizadas estão na tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Constantes de linha para o modelo de sistema utilizado

CONSTANTES	MÓDULOS		
	Módulo Terra (1)	Módulo Aéreo (2)	Módulo Aéreo (3)
Impedância característica Z [ohm]	617.994-j37.2315	270.390-j7.91833	270.390-j7.91833
Constante de propagação da linha λ [rad/km]	0.8414e-07+j0.1396e-05	0.3143e-07+j0.1073e-05	0.3143e-07+j0.1073e-05

4.2.1 - DETERMINAÇÃO DO INSTANTE DE OCORRÊNCIA DA FALTA

Conforme 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 grandes variações, verificou-se que uma falta ocorreu. Para uma taxa amostral de 4 kHz, o número de amostras por ciclo é de 67 amostras (60 Hz). Portanto, o instante de ocorrência de uma falta, com um ciclo de dados pré-falta, deveria ser correspondente à amostra de número 68. Nos testes realizados, o atraso máximo ocorrido para a detecção desse instante foi de 3 amostras, sendo que o mesmo ocorreu para taxas amostrais de 2 kHz e 1 kHz. Este atraso não exerce nenhuma consequência, direta ou indireta, sobre a precisão do algoritmo.

4.2.2 - EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS DAS ONDAS DE TENSÃO E CORRENTE ATRAVÉS DA TDF

A TDF extrai as componentes fundamentais das ondas ruidosas de tensão e corrente dos dados pós-falta. Exemplos deste processo de extração podem ser observados nas fig. 4.3 e 4.4, com as ondas ruidosas e suas componentes fundamentais sobrepostas, para uma falta AT e uma falta BCT respectivamente.

FIGURA 4.3 - Um ciclo de uma onda de corrente ruidosa (fase c) e sua componente fundamental extraída pela TDF para uma falta ACT a 120 km de S com resistência de falta nula

FIGURA 4.4 - Onda de tensão faltosa (fase c) com componente fundamental para uma falta ACT a 120 km de S com resistência de falta nula

Através das figuras tem-se a confirmação de que a técnica de filtragem proposta é bastante eficaz para a finalidade pela qual foi incorporada ao algoritmo.

4.2.3 - CLASSIFICAÇÃO DA FALTA

A fig. 4.5 apresenta os resultados da subrotina de classificação de falta para diferentes tipos de faltas a 30 km da linha de transmissão representada pela fig. 4.1. Os valores dos fasores I_{sa}'' , I_{sb}'' , I_{sc}'' e I_{s0}'' são normalizados pela fase com o fasor de maior valor. Usando como referência o fator $k=0,3$, considera-se que fasores de valor inferior a 0,3 são normais e fasores de valor superior a 0,7 são faltosos. A existência ou não da componente de sequência zero indica se a falta envolve terra. Os testes demonstraram que a subrotina de classificação da falta foi capaz de classificar corretamente os tipos de faltas para todos os casos estudados.

4.2.4 - CÁLCULO DA DISTÂNCIA DA FALTA EM RELAÇÃO AO TERMINAL LOCAL

O passo final foi a aplicação do Método Newton-Raphson para a obtenção da distância da falta em relação ao terminal local. O método foi aplicado sobre as equações (3.44) e (3.45).

FIGURA 4.5 - Gráficos dos parâmetros I''_{Sa} , I''_{Sb} , I''_{Sc} e I''_{S0} para uma falta à 30 km do terminal S com $R_F = 10$ ohms

Para a maioria dos casos, as soluções convergiram em 3 iterações. Um processo iterativo é mostrado na fig. 4.6 para uma falta AT a 122 km do terminal, para uma linha de 200 km.

FIGURA 4.6 - Processo iterativo de solução de uma falta AT a 122 Km do terminal local S ($R_F=0\Omega$)

A margem de erro dos cálculos é expressa como uma porcentagem do comprimento total da linha e é dada pela expressão:

$$\% \text{ erro} = \frac{|\text{distância estimada} - \text{distância real}|}{\text{comprimento da linha}} \times 100\% \quad (4.1)$$

Esta seção avalia o desempenho do algoritmo localizador sob diferentes condições de faltas do sistema. Para a configuração apresentada na fig. 4.1 são mostrados resultados para os diferentes tipos de faltas

existentes. São também descritos resultados baseados em mudanças realizadas na configuração de linha.

4.2.5 - Influência dos tipos de faltas

A tabela 4.2 apresenta uma série de estimações de localizações de vários tipos de faltas para a linha de transmissão considerada (fig. 4.1), com $R_F = 0\Omega$. Pode ser observado que o erro máximo ocorre para faltas próximas ao terminal remoto de linha.

Nas faltas envolvendo terra, calculadas pela eq. (3.44), a margem de erro foi a mesma tanto para faltas monofásicas como para multifásicas. Para as faltas que não envolvem terra, estimadas através da eq. (3.45), torna-se aparente que o erro para as faltas trifásicas é maior que o erro para faltas envolvendo somente duas fases.

Nos testes realizados para posições diferentes da linha de transmissão, as estimações mais precisas foram encontradas para faltas localizadas entre o terminal local e o meio da linha, com um erro ao redor de 2,5%. Isto valida o método, uma vez que o seu baixo custo permite que o mesmo seja instalado independentemente nos terminais local e remoto, prolongando sua precisão por toda a extensão da linha.

4.2.6 - Efeito da resistência de falta

A configuração da linha modelada (fig. 4.1) utiliza inicialmente uma resistência de falta de 0Ω . Para avaliar o efeito da resistência de falta no

TABELA 4.2 - EFEITO DO TIPO DE FALTA ($R_F = 0\Omega$)

Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
05	5.205	0.10	AT
05	5.249	0.12	BT
05	4.933	0.04	CT
05	4.824	0.09	ABT
05	5.677	0.34	ACT
05	5.181	0.09	BCT
05	4.838	0.08	AB
05	5.471	0.24	AC
05	5.250	0.12	BC
05	4.922	0.04	ABC
20	20.50	0.25	AT
20	20.998	0.50	BT
20	19.54	0.23	CT
20	19.754	0.12	ABT
20	21.271	0.64	ACT
20	19.716	0.14	BCT
20	20.278	0.14	AB
20	19.9615	0.02	AC
20	20.421	0.21	BC
20	19.346	0.33	ABC
40	40.659	0.33	AT
40	42.05	1.02	BT
40	38.946	0.53	CT
40	39.841	0.08	ABT
40	41.72	0.86	ACT
40	38.802	0.60	BCT
40	40.969	0.48	AB
40	39.208	0.40	AC
40	40.666	0.33	BC
40	38.496	0.75	ABC
85	89.416	2.21	BT
85	82.510	1.24	CT
85	85.510	0.26	ABT
85	87.723	1.36	ACT
85	81.861	1.57	BCT
85	88.039	1.52	AB
85	82.687	1.16	AC
85	85.521	0.26	BC

Distância Real (km)	Dist. Estimada	% DE ERRO	Tipo de Falta
99	101.008	1.00	AT
99	104.139	2.57	BT
99	95.530	1.73	CT
99	99.606	0.30	ABT
99	101.887	1.44	ACT
99	95.234	1.88	BCT
99	101.514	1.26	AB
99	96.125	1.44	AC
99	99.619	0.31	BC
99	94.864	2.07	ABC
135	136.022	0.51	AT
135	142.246	3.62	BT
135	130.967	2.02	CT
135	130.079	2.46	ABT
135	136.648	0.82	ACT
135	129.729	2.64	BCT
135	134.658	0.17	AB
135	127.952	3.52	AC
135	136.076	0.52	BC
135	127.015	3.99	ABC
160	162.415	1.21	AT
160	167.057	3.53	BT
160	153.259	3.37	CT
160	156.531	1.73	ABT
160	160.655	0.33	ACT
160	153.254	3.37	BCT
160	159.833	0.08	AB
160	150.660	4.67	AC
160	161.909	0.95	BC
160	149.448	5.28	ABC
180	180.551	0.28	AT
180	185.595	2.80	BT
180	171.201	4.40	CT
180	176.496	1.75	ABT
180	183.174	1.59	ACT
180	184.717	2.36	AB
180	173.291	3.35	AC
180	183.350	1.67	BC

modelo proposto, foram realizados testes com resistência de 30Ω e de 10Ω , mostradas nas tabelas 4.3 e 4.4 respectivamente.

Nestes casos, houve um aumento generalizado na margem de erro do algoritmo, principalmente para uma resistência de 30Ω . Mas, a margem de erro até o meio da linha para alguns tipos de faltas ainda está em um nível aceitável para uma situação real. Testes foram feitos para resistências altas, de 100 a 150Ω . Para estes valores, o algoritmo apresentou um desempenho altamente comprometido, o que praticamente o torna inviável sob estas condições. Esta dependência da resistência de falta é esperada em métodos baseados na medição da impedância utilizando dados de um único terminal.

4.2.7 - Efeito da taxa amostral utilizada

Os dados gerados pelo pacote TEER, citado no capítulo anterior, para a configuração da fig. 4.1, foram obtidos com uma taxa amostral de 4 kHz. As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os resultados para simulações com dados obtidos sob a taxa de 1 kHz e 2 kHz.

Apesar de ser esperado que o desempenho do método piorasse, o mesmo não ocorreu. O algoritmo manteve a margem de erro ao redor de 2,5% tanto para taxa amostral de 1 kHz como para 2 kHz. Testes complementares mostraram que a precisão não é afetada pelas taxas amostrais estudadas.

TABELA 4.3 - EFEITO DE RESISTÊNCIA DE 30 ohms

RESIS-TÊNCIA (ohms)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
30 Ω	05	11.85	3.43	CT
30 Ω	05	41.41	18.21	ABT
30 Ω	05	42.238	18.62	AB
30 Ω	20	30.98	5.49	AT
30 Ω	20	6.52	6.89	BCT
30 Ω	20	---	---	AC
30 Ω	40	97.91	28.71	ABT
30 Ω	40	72.70	16.35	BC
30 Ω	40	47.70	3.85	ABC
30 Ω	65	64.61	0.20	BT
30 Ω	65	51.323	6.84	BCT
30 Ω	65	99.88	17.44	BC
30 Ω	85	110.8	12.92	AT
30 Ω	85	83.66	0.57	BT
30 Ω	85	87.254	1.13	CT
30 Ω	99	178.68	39.84	ABT
30 Ω	99	136.66	18.83	BC
30 Ω	99	104.10	2.55	ABC
30 Ω	101	223.13	61.07	ABT
30 Ω	101	111.87	5.44	ABC
30 Ω	115	155.27	20.14	AT
30 Ω	115	120.34	2.67	CT
30 Ω	135	138.48	1.74	BT
30 Ω	135	86.92	24.04	BCT
30 Ω	135	225.95	45.48	BC
30 Ω	160	391.18	115.6	ABT
30 Ω	160	286.81	63.40	BC
30 Ω	160	209.91	24.96	ABC
30 Ω	180	268.89	44.42	AT
30 Ω	180	57.74	61.13	BCT

TABELA 4.4 - EFEITO DE RESISTÊNCIA DE 10 ohms

RESIS-TÊNCIA (ohms)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
10 Ω	05	7.025	1.01	CT
10 Ω	05	16.996	6.00	ABT
10 Ω	05	20.959	7.98	AB
10 Ω	20	26.575	3.29	AT
10 Ω	20	15.036	2.48	BCT
10 Ω	20	11.762	4.12	AC
10 Ω	40	60.736	10.37	ABT
10 Ω	40	53.107	6.55	BC
10 Ω	40	37.790	1.10	ABC
10 Ω	65	66.623	0.81	BT
10 Ω	65	52.931	6.03	BCT
10 Ω	65	79.644	7.32	BC
10 Ω	85	97.392	6.20	AT
10 Ω	85	87.470	1.23	BT
10 Ω	85	77.308	3.85	CT
10 Ω	99	88.336	5.33	ABT
10 Ω	99	130.157	15.58	BC
10 Ω	99	113.881	7.44	ABC
10 Ω	101	92.124	4.44	ABT
10 Ω	101	140.131	19.57	ABC
10 Ω	115	148.734	16.87	AT
10 Ω	115	133.112	9.06	BC
10 Ω	135	169.857	17.43	AT
10 Ω	135	155.536	10.27	ACT
10 Ω	135	124.658	5.17	BC
10 Ω	160	149.605	5.20	ABT
10 Ω	160	238.278	39.14	BC
10 Ω	160	204.234	22.12	ABC
10 Ω	180	143.628	18.19	AT
10 Ω	180	225.499	22.75	BCT

TABELA 4.5 - EFEITO DA TAXA AMOSTRAL DE 1 kHz ($R_F = 0\Omega$)

TAXA AMOSTRAL	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
1 kHz	05	5.701	0.35	AT
1 kHz	05	4.662	0.17	ABT
1 kHz	05	7.649	1.32	AC
1 kHz	20	21.199	0.60	BT
1 kHz	20	20.574	0.29	BCT
1 kHz	20	18.715	0.64	AB
1 kHz	40	39.137	0.43	CT
1 kHz	40	43.703	1.85	ACT
1 kHz	40	38.815	0.59	ABC
1 kHz	65	61.662	1.67	BC
1 kHz	65	69.387	2.19	ACT
1 kHz	65	63.823	0.59	BCT
1 kHz	85	88.528	1.76	AT
1 kHz	85	90.054	2.53	BT
1 kHz	85	82.869	1.07	CT
1 kHz	99	100.703	0.85	ABT
1 kHz	99	96.495	1.25	BCT
1 kHz	99	95.277	1.86	ABC
1 kHz	101	103.574	1.29	ABT
1 kHz	101	102.831	0.92	BCT
1 kHz	115	121.924	3.46	AT
1 kHz	115	122.852	3.95	BT
1 kHz	135	127.294	3.85	BC
1 kHz	135	148.994	7.00	ACT
1 kHz	160	156.145	1.93	CT
1 kHz	160	155.690	2.16	ABC
1 kHz	180	192.318	6.16	BT
1 kHz	180	177.991	1.00	BCT

TABELA 4.6 - EFEITO DA TAXA AMOSTRAL DE 2 kHz ($R_F = 0\Omega$)

TAXA AMOSTRAL	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
2 kHz	05	5.148	0.08	AT
2 kHz	05	5.448	0.22	ABT
2 kHz	05	3.801	0.60	AC
2 kHz	20	20.156	0.08	BT
2 kHz	20	18.863	0.57	BCT
2 kHz	20	22.493	1.25	AB
2 kHz	40	34.307	0.85	CT
2 kHz	40	41.070	0.54	ACT
2 kHz	40	37.724	1.14	ABC
2 kHz	65	68.697	1.85	BC
2 kHz	65	66.902	0.95	ACT
2 kHz	65	61.597	1.70	BCT
2 kHz	85	87.777	1.39	AT
2 kHz	85	85.867	0.43	BT
2 kHz	85	81.101	1.95	CT
2 kHz	99	100.938	0.97	ABT
2 kHz	99	93.704	2.65	BCT
2 kHz	99	93.034	2.98	ABC
2 kHz	101	101.931	0.47	ABT
2 kHz	101	94.762	3.12	BCT
2 kHz	115	117.399	1.20	AT
2 kHz	115	116.133	0.57	BT
2 kHz	135	146.492	5.75	BC
2 kHz	135	137.217	1.11	ACT
2 kHz	160	152.071	3.96	CT
2 kHz	160	148.597	5.70	ABC
2 kHz	180	182.173	1.09	BT
2 kHz	180	168.605	5.70	BCT

4.2.8 - Efeito de diferentes capacidades de curto circuito na fonte local

A tabela 4.7 ilustra algumas estimações para valores diferentes de capacidade da fonte local. Novamente a precisão do método não foi afetada. Os resultados obtidos apresentaram uma margem de erro igual ao teste da configuração utilizada como base deste capítulo, o que mostra que o algoritmo é bastante eficaz e se comporta bem sob condições diferentes da capacidade da fonte local.

4.2.9 - Efeito do comprimento da linha de transmissão

A tabela 4.8 apresenta resultados para uma linha idêntica à da fig. 4.1, mas com comprimento de 100 km, ao invés de 200 km. A tabela 4.9 mostra estimativas para uma linha com 400 km.

Em ambos os casos, a margem de erro foi praticamente a mesma do caso com linha de 200 km descrito no item anterior, ou seja, 2,5% de erro até o meio da linha. Portanto, o método mostrou-se indiferente ao comprimento de linha utilizado.

4.3 - TESTES DO ALGORITMO COM DADOS OBTIDOS NOS DOIS TERMINAIS

Para os testes realizados para este algoritmo também foram utilizados dados de entrada gerados pelo pacote TEER e se referem ao mesmo sistema descrito anteriormente pela fig. 4.1. A tabela 4.10 contém os valores da matriz impedância Z_{abc} .

TABELA 4.7 - EFEITO DA CAPACIDADE DA FONTE ($R_F = 0\Omega$)

Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Capacidade da Fonte (GVA)	Tipo de Falta
05	5.136	0.07	50	AT
05	5.329	0.16	10	AT
05	5.569	0.28	5	AT
20	19.959	0.02	50	ABT
20	19.557	0.22	10	ABT
20	19.471	0.26	5	ABT
40	38.855	0.57	50	CT
40	39.068	0.47	10	CT
40	39.228	0.39	5	CT
85	88.070	1.53	50	AB
85	85.751	0.38	10	AB
85	83.262	0.87	5	AB
99	94.575	2.21	50	ABC
99	94.243	2.38	10	ABC
99	94.500	2.25	5	ABC
115	111.677	1.66	50	BCT
115	111.588	1.71	10	BCT
115	111.548	1.73	5	BCT
160	150.660	4.67	50	AC
160	150.660	4.67	10	AC
160	150.660	4.67	5	AC
180	185.694	2.85	50	BT
180	183.041	1.52	10	BT
180	182.934	1.47	5	BT
195	193.917	0.54	50	ACT
195	193.600	0.70	10	ACT
195	193.129	0.94	5	ACT

TABELA 4.8 - EFEITO DA LINHA
COM 100 KM ($R_F = 0\Omega$)

COMPRI- MENTO (KM)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
100 km	03	3.165	0.16	AT
100 km	03	3.22	0.22	BCT
100 km	03	3.559	0.56	AC
100 km	10	10.487	0.48	BT
100 km	10	9.775	0.22	ABT
100 km	10	9.741	0.26	ABC
100 km	20	19.536	0.46	CT
100 km	20	20.473	0.47	BC
100 km	20	21.251	1.25	ACT
100 km	33	32.766	0.23	ABT
100 km	33	33.666	0.66	BC
100 km	33	31.794	1.21	ABC
100 km	43	44.637	1.63	ACT
100 km	43	44.131	1.13	AB
100 km	43	43.816	0.81	BC
100 km	49	49.741	0.74	AT
100 km	49	48.766	0.23	ABT
100 km	49	47.071	1.93	ABC
100 km	49	49.909	0.91	BC
100 km	51	48.404	2.60	ABC
100 km	51	50.021	0.98	ABT
100 km	57	55.193	1.81	AB
100 km	57	61.395	4.39	ABT
100 km	67	68.445	1.44	BC
100 km	67	65.382	1.62	ABT
100 km	80	85.656	5.65	ACT
100 km	80	81.805	1.80	BC
100 km	90	85.669	4.33	ABC
100 km	90	87.897	2.10	ABT
100 km	97	93.148	3.85	ABC
100 km	97	94.009	2.99	BCT

TABELA 4.9 - EFEITO DA LINHA
COM 400 KM ($R_F = 0\Omega$)

COMPRI- MENTO (KM)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
400 km	10	10.295	0.07	AT
400 km	10	10.056	0.02	BCT
400 km	10	10.202	0.05	AC
400 km	40	42.101	0.53	BT
400 km	40	39.808	0.05	ABT
400 km	40	38.436	0.39	ABC
400 km	80	77.707	0.57	CT
400 km	80	81.299	0.32	BC
400 km	80	82.417	0.60	ACT
400 km	130	130.715	0.18	ABT
400 km	130	132.072	0.52	BC
400 km	130	122.207	1.95	ABC
400 km	170	172.635	0.66	ACT
400 km	170	174.241	1.06	AB
400 km	170	172.928	0.73	BC
400 km	198	202.97	1.24	AT
400 km	198	198.433	0.11	ABT
400 km	198	185.73	3.06	ABC
400 km	202	188.025	3.49	ABC
400 km	202	200.633	0.34	ABT
400 km	230	228.482	0.38	AB
400 km	230	229.711	0.07	ABT
400 km	270	282.160	3.04	BC
400 km	270	271.583	0.40	ABT
400 km	320	328.851	2.21	ACT
400 km	320	340.427	5.11	BC
400 km	360	332.980	6.76	ABC
400 km	360	368.661	2.17	ABT
400 km	390	375.975	3.51	ABC
400 km	390	636.256	6.69	BCT

TABELA 4.10 - Matriz impedância série da linha, Z_{abc} , para o modelo de sistema utilizado

$$\begin{bmatrix} 0.52e-01 + j 0.59 & 0.34e-01 + j 0.26 & 0.33e-01 + j 0.19 \\ 0.34e-01 + j 0.26 & 0.50e-01 + j 0.58 & 0.32e-01 + j 0.23 \\ 0.33e-01 + j 0.19 & 0.32e-01 + j 0.23 & 0.48e-01 + j 0.55 \end{bmatrix} \quad [\Omega / \text{km}]$$

Os resultados obtidos nas etapas de detecção do instante de falta, extração dos fasores fundamentais e classificação da falta foram similares aos conseguidos para o algoritmo com dados de um terminal, descritos nas seções 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, respectivamente, não sendo necessário mencioná-los novamente.

Para sincronização foram testados casos em que o instante de detecção em cada terminal variava de 2 até 5 amostras. Através da teoria empregada no procedimento de sincronização descrita no Capítulo anterior, foi possível a estimação dessa variação no tempo. Para todos os casos simulados, conseguiu-se uma sincronização em relação a um eixo de referência comum.

4.3.1 - ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DA FALTA EM RELAÇÃO AO TERMINAL S

A solução final da distância d é obtida através da eq. (3.55). Esta equação é linear e portanto a solução é efetuada de modo direto. Novamente, para este caso, a margem de erro será expressa como uma porcentagem do comprimento total da linha, dada pela expressão representada na eq. (4.1).

A avaliação do algoritmo obedecerá aos mesmos critérios adotados para o algoritmo anterior, ou seja, serão avaliadas diferentes condições de falta e diferentes configurações de linha. Ambos os algoritmos foram submetidos a um mesmo conjunto de testes, permitindo uma melhor comparação entre seus desempenhos.

4.3.2 - Efeito dos diferentes tipos de faltas

Estimações de localizações para tipos diferentes de faltas podem ser vistas na tabela 4.11. Estes cálculos foram obtidos com a linha de transmissão representada na fig. 4.1, com $R_F = 0\Omega$. Pode ser notado que a porcentagem de erro ficou em torno de 0,5 %, chegando a 1,2 % para casos isolados. Estes casos não são significativos.

Os piores casos obtidos foram para faltas não envolvendo terra, com exceção das faltas trifásicas, que apresentaram erros menores que 0,5 %. Para os demais casos, a margem de erro manteve-se bastante baixa, com os menores erros relativos às faltas fase-terra, onde foram registrados erros de 0,01 %.

Diferentemente do algoritmo para dados de um terminal, o algoritmo para dados de dois terminais não apresentou piores resultados à medida que a posição da falta se deslocava em direção ao terminal remoto.

TABELA 4.11 - EFEITO DO TIPO DE FALTA ($R_F = 0\Omega$)

Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
05	4.83	0.08	AT
05	5.28	0.14	BT
05	5.01	0.01	CT
05	5.15	0.07	ABT
05	5.59	0.30	ACT
05	4.90	0.05	BCT
05	3.98	0.51	AB
05	7.17	1.08	AC
05	5.59	0.30	BC
05	5.87	0.44	ABC
20	19.88	0.06	AT
20	20.60	0.30	BT
20	20.54	0.27	CT
20	19.93	0.04	ABT
20	20.67	0.34	ACT
20	20.51	0.26	BCT
20	19.11	0.44	AB
20	21.18	0.59	AC
20	20.50	0.25	BC
20	20.42	0.21	ABC
40	39.89	0.06	AT
40	40.68	0.34	BT
40	40.93	0.47	CT
40	40.05	0.03	ABT
40	40.85	0.43	ACT
40	40.86	0.43	BCT
40	40.55	0.28	AB
40	41.06	0.53	AC
40	40.80	0.40	BC
40	40.83	0.42	ABC
85	8.16	0.58	BT
85	85.68	0.34	CT
85	85.52	0.26	ABT
85	85.02	0.01	ACT
85	85.27	0.14	BCT
85	87.03	1.01	AB
85	84.43	0.28	AC
85	84.61	0.20	BC

Distância Real (km)	Dist. Estimada	% DE ERRO	Tipo de Falta
99	99.12	0.06	AT
99	99.03	0.02	BT
99	99.16	0.08	CT
99	100.04	0.52	ABT
99	97.71	0.64	ACT
99	99.31	0.16	BCT
99	101.09	0.55	AB
99	96.55	1.23	AC
99	98.64	0.18	BC
99	98.73	0.14	ABC
135	135.08	0.08	AT
135	134.63	0.18	BT
135	134.25	0.38	CT
135	134.16	0.42	ABT
135	134.90	0.05	ACT
135	134.22	0.39	BCT
135	133.50	0.75	AB
135	135.27	0.14	AC
135	133.88	0.56	BC
135	134.42	0.29	ABC
160	160.11	0.06	AT
160	159.32	0.34	BT
160	159.06	0.47	CT
160	159.95	0.03	ABT
160	159.15	0.43	ACT
160	159.14	0.43	BCT
160	158.93	0.54	AB
160	159.19	0.41	AC
160	159.17	0.41	BC
160	159.17	0.42	ABC
180	180.11	0.05	AT
180	179.39	0.30	BT
180	179.45	0.44	CT
180	180.07	0.04	ABT
180	179.32	0.34	ACT
180	179.49	0.25	BCT
180	180.88	0.44	AB
180	178.81	0.59	AC
180	179.50	0.25	BC
180	179.58	0.21	ABC

4.3.3 - Efeito da resistência de falta

Os testes realizados até aqui consideraram uma resistência de falta nula. Foram realizados testes com resistência de falta de 30Ω , vistos na tabela 4.12, e 10Ω , na tabela 4.13, para a configuração da fig. 4.1.

Em ambos os testes houve um aumento nas margens de erro de vários casos, chegando a extremos de 8 % em alguns. Mas, estas margens ainda são aceitáveis e não invalidam o algoritmo. As porcentagens de erro mantiveram-se em um limite de 2,5 % para a grande maioria dos testes, sendo este um bom resultado para localizadores de faltas. Mesmo com as resistências acima, o algoritmo produziu um resultado confiável. Para testes com resistências mais altas, de 100Ω a 150Ω , o algoritmo ainda produziu um resultado satisfatório.

4.3.4 - Efeito da taxa amostral utilizada

As tabelas 4.14 e 4.15 contêm os testes simulados com dados gerados pelo pacote TEER com taxas amostrais de 1 kHz e 2 kHz.

Como nos testes para o algoritmo com dados de um terminal, a margem de erro não aumentou, mantendo-se na faixa máxima de 0,5 %, para taxas amostrais de 1 kHz e 2 kHz. Portanto, as taxas amostrais estudadas não interferem na precisão do algoritmo.

TABELA 4.12 - EFEITO DE RESISTÊNCIA DE 30 ohms

RESIS-TÊNCIA (ohms)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
30 Ω	05	2.35	1.33	CT
30 Ω	05	5.54	0.27	ABT
30 Ω	05	9.53	2.27	AB
30 Ω	20	15.38	2.31	AT
30 Ω	20	7.91	6.05	BCT
30 Ω	20	12.74	3.63	AC
30 Ω	40	32.27	3.86	ABT
30 Ω	40	32.64	3.68	BC
30 Ω	40	23.89	8.06	ABC
30 Ω	65	63.36	0.82	BT
30 Ω	65	60.49	2.25	BCT
30 Ω	65	56.53	4.23	BC
30 Ω	85	86.01	1.00	AT
30 Ω	85	82.91	1.04	BT
30 Ω	85	93.80	0.60	CT
30 Ω	99	98.56	0.22	ABT
30 Ω	99	95.28	1.86	BC
30 Ω	99	98.26	0.37	ABC
30 Ω	101	101.44	0.22	ABT
30 Ω	101	101.74	1.48	ABC
30 Ω	115	113.99	1.00	AT
30 Ω	115	117.97	1.48	CT
30 Ω	135	136.64	0.82	BT
30 Ω	135	139.50	2.25	BCT
30 Ω	135	143.47	4.23	BC
30 Ω	160	167.72	3.86	ABT
30 Ω	160	167.36	3.68	BC
30 Ω	160	176.11	8.06	ABC
30 Ω	180	184.62	2.31	AT
30 Ω	180	192.10	6.05	BCT

TABELA 4.13 - EFEITO DE RESISTÊNCIA DE 10 ohms

RESIS-TÊNCIA (ohms)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
10 Ω	05	2.84	1.08	CT
10 Ω	05	1.85	1.57	ABT
10 Ω	05	2.52	1.24	AB
10 Ω	20	18.02	0.99	AT
10 Ω	20	16.10	1.95	BCT
10 Ω	20	18.81	0.59	AC
10 Ω	40	37.25	1.37	ABT
10 Ω	40	37.95	1.02	BC
10 Ω	40	35.11	2.44	ABC
10 Ω	65	65.21	0.11	BT
10 Ω	65	63.04	0.98	BCT
10 Ω	65	62.23	1.38	BC
10 Ω	85	85.61	0.31	AT
10 Ω	85	85.01	0.01	BT
10 Ω	85	85.18	0.09	CT
10 Ω	99	98.66	0.17	ABT
10 Ω	99	96.45	1.27	BC
10 Ω	99	97.39	0.81	ABC
10 Ω	101	101.33	0.17	ABT
10 Ω	101	102.61	0.81	ABC
10 Ω	115	114.39	0.31	AT
10 Ω	115	117.14	1.07	BC
10 Ω	135	134.79	0.11	AT
10 Ω	135	136.92	0.96	ACT
10 Ω	135	137.77	1.38	BC
10 Ω	160	162.75	1.37	ABT
10 Ω	160	162.05	1.02	BC
10 Ω	160	164.89	2.44	ABC
10 Ω	180	181.98	0.99	AT
10 Ω	180	183.90	1.95	BCT

TABELA 4.14- EFEITO DA TAXA AMOSTRAL DE 1 KHZ ($R_F = 0\Omega$)

TAXA AMOSTRAL	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
1 kHz	05	5.15	0.08	AT
1 kHz	05	5.02	0.01	ABT
1 kHz	05	6.50	0.75	AC
1 kHz	20	20.19	0.10	BT
1 kHz	20	19.90	0.05	BCT
1 kHz	20	19.10	0.45	AB
1 kHz	40	40.55	0.28	CT
1 kHz	40	39.63	0.19	ACT
1 kHz	40	39.18	0.41	ABC
1 kHz	65	64.58	0.21	BC
1 kHz	65	64.23	0.39	ACT
1 kHz	65	65.09	0.05	BCT
1 kHz	85	84.52	0.24	AT
1 kHz	85	85.04	0.02	BT
1 kHz	85	85.62	0.31	CT
1 kHz	99	98.92	0.04	ABT
1 kHz	99	99.25	0.23	BCT
1 kHz	99	96.95	1.02	ABC
1 kHz	101	101.08	0.04	ABT
1 kHz	101	100.75	0.23	BCT
1 kHz	115	115.48	0.24	AT
1 kHz	115	114.96	0.02	BT
1 kHz	135	135.41	0.21	BC
1 kHz	135	135.77	0.39	ACT
1 kHz	160	159.45	0.28	CT
1 kHz	160	160.82	0.41	ABC
1 kHz	180	179.80	0.10	BT
1 kHz	180	180.10	0.05	BCT

TABELA 4.15 - EFEITO DA TAXA AMOSTRAL DE 2 KHZ ($R_F = 0\Omega$)

TAXA AMOSTRAL	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
2 kHz	05	5.08	0.04	AT
2 kHz	05	5.11	0.06	ABT
2 kHz	05	6.57	0.79	AC
2 kHz	20	20.38	0.19	BT
2 kHz	20	20.02	0.01	BCT
2 kHz	20	18.87	0.56	AB
2 kHz	40	40.64	0.32	CT
2 kHz	40	40.56	0.28	ACT
2 kHz	40	40.16	0.08	ABC
2 kHz	65	64.40	0.30	BC
2 kHz	65	64.68	0.16	ACT
2 kHz	65	65.10	0.05	BCT
2 kHz	85	85.44	0.2	AT
2 kHz	85	85.06	0.03	BT
2 kHz	85	85.78	0.39	CT
2 kHz	99	99.98	0.49	ABT
2 kHz	99	99.07	0.04	BCT
2 kHz	99	98.59	0.20	ABC
2 kHz	101	100.02	0.49	ABT
2 kHz	101	100.93	0.04	BCT
2 kHz	115	114.55	0.23	AT
2 kHz	115	114.93	0.04	BT
2 kHz	135	135.60	0.30	BC
2 kHz	135	135.32	0.16	ACT
2 kHz	160	159.36	0.32	CT
2 kHz	160	159.83	0.08	ABC
2 KHz	180	179.61	0.19	BT
2 kHz	180	179.98	0.02	BCT

4.3.5 - Efeito de diferentes capacidades de curto circuito nas fontes

Foram testados casos em que as fontes S e R da fig. 4.1 foram respectivamente de: 50 GVA e 5 GVA, 10 GVA e 20 GVA, 5 GVA e 50 GVA. Estes testes estão apresentados na tabela 4.16. A margem de erro manteve-se ao redor de 0,5 %, com casos isolados de 1 a 2 %. Esses casos ocorreram para faltas envolvendo duas fases.

4.3.6 - Efeito do comprimento da linha de transmissão

Foram simulados casos em que a linha da fig. 4.1 teve seu comprimento alterado de 200 para 100 e 400 km, como no caso do algoritmo utilizando dados de um terminal. Estes testes são mostrados nas tabelas 4.17 e 4.18 respectivamente.

Para qualquer um dos comprimentos de linha utilizados, a margem de erro manteve-se dentro do limite de 0,5 %, com alguns casos isolados chegando a 1,7 % de erro. Mas, de uma forma geral, este método também é insensível aos comprimentos de linha de transmissão testados.

**TABELA 4.16 - EFEITO DE CAPACIDADES
DIFERENTES DAS FONTES ($R_F = 0\Omega$)**

Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta	Capacidade da Fonte S	Capacidade da Fonte R
05	4.84	0.08	AT	50	5
05	4.88	0.06	AT	10	20
05	4.36	0.32	AT	5	50
20	19.44	.28	ABT	50	5
20	19.48	0.26	ABT	10	20
20	19.57	0.22	ABT	5	50
40	40.35	0.18	CT	50	5
40	40.03	0.01	CT	10	20
40	39.53	0.24	CT	5	50
85	87.42	1.21	AB	50	5
85	83.28	2.66	AB	10	20
85	80.42	2.29	AB	5	50
99	101.82	1.41	ABC	50	5
99	97.89	0.55	ABC	10	20
99	95.93	1.53	ABC	5	50
115	112.08	1.46	ACT	50	5
115	113.76	0.62	ACT	10	20
115	115.83	0.42	ACT	5	50
160	155.27	2.37	AC	50	5
160	157.08	1.46	AC	10	20
160	160.22	0.11	AC	5	50
180	179.45	0.27	BT	50	5
180	179.42	0.29	BT	10	20
180	179.45	0.27	BT	5	50
195	194.70	0.15	BCT	50	5
195	194.25	0.38	BCT	10	20
195	194.12	0.44	BCT	5	50

TABELA 4.17 - EFEITO DA LINHA
COM 100 KM ($R_F = 0\Omega$)

COMPRI- MENTO (KM)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
100 km	03	3.14	0.14	AT
100 km	03	2.92	0.08	BCT
100 km	03	4.24	1.24	AC
100 km	10	10.02	0.02	BT
100 km	10	10.08	0.08	ABT
100 km	10	10.49	0.49	ABC
100 km	20	20.09	0.09	CT
100 km	20	20.34	0.34	BC
100 km	20	19.94	0.06	ACT
100 km	33	33.18	0.18	ABT
100 km	33	33.37	0.37	BC
100 km	33	33.06	0.06	ABC
100 km	43	42.19	0.81	ACT
100 km	43	44.70	1.70	AB
100 km	43	43.38	0.38	BC
100 km	49	49.02	0.02	AT
100 km	49	49.15	0.15	ABT
100 km	49	48.99	0.01	ABC
100 km	51	51.01	0.01	ABC
100 km	51	50.85	0.15	ABT
100 km	57	55.30	1.70	AB
100 km	57	57.81	0.81	ABT
100 km	67	66.62	0.38	BC
100 km	67	66.82	0.18	ABT
100 km	80	80.06	0.06	ACT
100 km	80	79.65	0.35	BC
100 km	90	89.50	0.50	ABC
100 km	90	89.91	0.09	ABT
100 km	97	96.61	0.39	ABC
100 km	97	97.07	0.07	BCT

TABELA 4.18 - EFEITO DA LINHA
COM 400 KM ($R_F = 0\Omega$)

COMPRI- MENTO (KM)	Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
400 km	10	9.77	0.06	AT
400 km	10	10.05	0.01	BCT
400 km	10	10.33	0.08	AC
400 km	40	42.36	0.59	BT
400 km	40	37.94	0.52	ABT
400 km	40	39.18	0.21	ABC
400 km	80	86.12	1.53	CT
400 km	80	76.71	0.82	BC
400 km	80	79.0	0.25	ACT
400 km	130	129.29	0.17	ABT
400 km	130	127.94	0.51	BC
400 km	130	128.54	0.37	ABC
400 km	170	170.97	0.24	ACT
400 km	170	173.38	0.85	AB
400 km	170	169.27	0.18	BC
400 km	198	198.13	0.03	AT
400 km	198	199.90	0.47	ABT
400 km	198	198.11	0.03	ABC
400 km	202	201.89	0.03	ABC
400 km	202	200.11	0.47	ABT
400 km	230	226.62	0.84	AB
400 km	230	229.03	0.24	ABT
400 km	270	272.05	0.51	BC
400 km	270	270.70	0.17	ABT
400 km	320	323.28	0.82	ACT
400 km	320	320.98	0.25	BC
400 km	360	362.05	0.51	ABC
400 km	360	360.82	0.21	ABT
400 km	390	392.43	0.61	ABC
400 km	390	389.95	0.01	BCT

5 - CONCLUSÃO

Foram implementados dois algoritmos para localização digital de faltas em linhas de transmissão de alta tensão. Um dos métodos possibilitou a localização de faltas usando apenas dados disponíveis em um terminal local. O outro método realiza determinação do local de ocorrência da falta utilizando dados obtidos nos dois terminais da linha. As técnicas propostas podem ser aplicadas para uma grande variedade de configurações de sistemas e condições de faltas encontradas na prática.

5.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O ALGORITMO BASEADO EM DADOS DE UM TERMINAL DA LINHA

O algoritmo foi desenvolvido utilizando componentes superpostos e modais de tensão e corrente, além de uma técnica especial de filtragem digital como meio de obtenção dos componentes fundamentais das ondas faltosas. Tudo isso, aliado a uma subrotina de classificação precisa do tipo de falta envolvida, torna o método bastante eficaz e com um alto grau de fidelidade para a localização de faltas, considerando-se baixos valores para a resistência de falta.

A técnica foi testada para várias configurações simuladas através de um pacote computacional. Pôde ser observado que, para a maioria dos casos estudados, o erro foi maior para as faltas ocorridas próximas ao terminal remoto da linha. Mesmo assim, em muitos casos, a porcentagem de erro apresentada para essas faltas foi inferior a 4%. Entretanto, esta margem de erro diminui consideravelmente a medida que a posição da falta se aproxima do terminal onde os cálculos são realizados, chegando a 0,5 % do comprimento da linha.

Os resultados dos testes realizados mostraram que o método obteve uma margem de erro ao redor de 2,5 % para faltas localizadas entre o terminal local e o meio da linha, considerando-se resistência de falta nula. Instalando-se o algoritmo independentemente nos dois terminais da linha, essa margem se prolongará por todo o comprimento da mesma, o que permitirá um monitoramento bastante preciso do sistema. A precisão não se alterou para diferentes tipos de faltas em diferentes posições da linha.

Foram realizados testes levando-se em consideração um grande número de condições distintas. O algoritmo se comportou bem para estes testes, mantendo a precisão anterior e mostrando-se independente do comprimento da linha, da taxa amostral empregada pelo registrador e de diferentes capacidades das fontes no terminal local.

Mas, para testes com resistências de falta diferentes de zero ($30\ \Omega$ e $10\ \Omega$), o método não obteve o mesmo sucesso. A precisão diminuiu consideravelmente e este demonstrou ser a grande deficiência do algoritmo, o que era esperado devido ao modo de obtenção dos dados utilizados, isto é, de apenas um terminal da linha de transmissão.

A grande vantagem deste algoritmo é o fato de que todos os dados necessários para os equacionamentos da localização são obtidos localmente, sendo assim um método barato e de fácil utilização.

5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O ALGORITMO BASEADO EM DADOS PROVENIENTES DOS DOIS TERMINAIS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

O algoritmo desenvolvido a partir de dados provenientes dos dois terminais da linha utiliza os componentes de fase dos fasores trifásicos fundamentais de tensão e corrente. Este método também requer que uma técnica especial de filtragem digital seja empregada para se obterem os componentes fundamentais das ondas faltosas. É necessário que os dados dos diferentes terminais estejam com uma referência de tempo comum, o que foi conseguido através do emprego de um método bastante simples e eficaz de sincronização. Tudo isso garante uma grande precisão para o algoritmo em sua utilização em grande variedade de situações de curto-circuito.

Como para o algoritmo para um terminal, este também foi exhaustivamente testado para várias configurações de linha, simuladas através do pacote computacional TEER. A margem de erro da maioria dos casos testados não excedeu 0,5 %. Para alguns casos essa margem foi maior, chegando a 1,5 %.

A margem de erros de 0,5 % foi mantida para diversas variações do sistema testado, não sendo influenciada por fatores como taxa amostral utilizada, comprimento da linha e capacidade de curto-circuito das fontes.

Mesmo para linhas com resistência de falta de 30Ω o algoritmo se comportou bem. Houve um aumento da margem de erro neste caso, mas mesmo assim esta margem manteve-se em torno de 1,5 e 2 %, o que é bastante aceitável para um localizador. Logo, este algoritmo não demonstrou ser afetado pelo tipo de falta e pela resistência de falta, ao contrário do algoritmo para um terminal, que não fornece essa garantia para resistências mais elevadas.

Portanto, o algoritmo utilizando dados provenientes dos dois terminais é mais preciso que o algoritmo utilizando dados de um terminal, além de ser mais confiável para casos em que a resistência de falta é mais elevada. Como inconveniente, requer que os dados estejam sincronizados no tempo, mas isto pode ser conseguido com a utilização da rotina implementada junto ao algoritmo. A desvantagem

do método é a necessidade de um canal de comunicação entre os terminais e o processador para envio dos dados.

5.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estimação da localização da falta é muito importante para auxiliar em uma análise rápida da falta e posterior restauração da linha de transmissão curto-circuitada, a fim de aumentar a qualidade do fornecimento de energia. Ambos os métodos descritos neste trabalho podem ser empregados para este propósito, com os dois apresentando razoável precisão para a maioria das aplicações, sem levar em consideração resistências de falta mais elevadas.

A grande vantagem de utilizar dados provenientes de apenas um terminal é que não são necessários canais de comunicação entre os terminais. Mas, como o uso das comunicações e tecnologias digitais continua a se expandir, no futuro, a integração das funções de um sistema de potência deve aumentar. Quando canais de comunicação estão disponíveis, o método baseado em dados dos dois terminais deve ser usado para garantir uma precisão maior na localização, mesmo em presença da resistência de falta.

O algoritmo com dados de dois terminais implementado aqui não necessita de canais de comunicação exclusivos ou muito velozes, podendo para isso utilizar apenas um modem ligado à uma linha telefônica comum. Como foi mostrado, este método possibilita a

localização precisa para várias condições de um sistema com resistência de falta significativa. Uma vez que canais de comunicação comuns, como linhas telefônicas, quase sempre estão disponíveis e acessíveis, este algoritmo pode ser empregado sem nenhum custo adicional para a companhia distribuidora de energia.

Concluindo, a escolha de um método de localização de falta depende quase que exclusivamente da disponibilidade dos dados e na existência de comunicação entre os terminais. Sempre que houver uma linha telefônica ou outro meio para comunicação dos dados, a melhor escolha é a utilização de um algoritmo que utilize dados dos dois terminais da linha.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aggarwall, 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, Vol. 8,Nº 3,Julho.

Cook, V. (1986), *Fundamental Aspects of Fault Location Algorithms Used in Distance Protection*, Proceedings IEE, 133, Part C, nº 6, Setembro, pp 359-368.

Coury, D.V. (1992) *A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders*, Tese (Doutorado) - Universidade de Bath.

Girgis, A.A. e Fallon, C.M. (1992) *Fault Location Techniques for Radial and Loop Transmission Systems using Digital Fault Recorded Data*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 7, nº 4, Outubro, pp 1936-1945.

- Girgis, A.A.; Hart, D.G.; Peterson, W.L. (1992) *A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Lines* - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, Janeiro, pp 98-107.
- Hamming, P.W. (1973) *Numerical Methods for Scientists and Engineers* - 2ª Edição, McGraw-Hill.
- Jeayasurya, B. e Rahman, M.A.(1989) *Accurate Fault Location of Transmission Lines Using Microprocessors*, IEE Fourth International Conference.
- Jonhs, A.T.; Aggarwall, R.K. (1976) *Digital Simulation of Faulted EHV Transmission Lines with Particular Reference to Very-High-Speed Protection* - Proc. IEE, Vol. 123, N° 4, Abril, pp 353-359.
- Johns, A.T. e Jamali, S. (1989) *New Accurate Transmission Line Fault Location Equipment*, IEE Fourth International Conference.
- Morrison, L. F. e Yang, Q. (1987) *Fault Location on High Voltage Transmission Lines Using Solid State Disturbance Recorders*, IEEE/CSEE Joint Conference on High Voltage Transmission Systems in China, Outubro, pp 154-160.
- Muruoka, M., Mitani, I., Inagaki, J. (1984) *Microprocessor Based Fault Locator*, Toshiba Review, n° 148, Summer, pp 11-14.

- Oppenheim, A.V.; Schafer, R.W. (1975) *Digital Signal Processing* - Prentice-Hall International Editions.
- Phadke, A.G.; Thorp, J.S. (1988) *Computer Relaying for Power Systems* - Research Studies Press LTD - John Wiley & Sons INC.
- Ranjbar, A. M., Shirani, A. R., Fathi, A. F. (1992) *A New Approach for Fault Location Problem on Power Lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 7, nº 1, Janeiro, pp 146-151.
- Richards, G. G., Tan, O. T. (1982) *Accurate Fault Location Estimator for Transmission Lines*, IEEE Transaction, PAS-101, nº 4, Abril, pp 945-950.
- Sachdev, M. S. e Aggarwall, R. (1985) *Accurate Fault Location Estimates from Digital Impedance Relay Measurements*, IEE Conference Publication, 249, 00 180-184.
- Saha, M. M., Erikson, L. (1985) *Microcomputer-Based Accurate Fault Locator with Remote-End Infeed Compensation*, IEE Conference Publication nº249, Abril, pp 193-198.
- Sant, M. T., Paithankar, Y. G. (1979) *On Line Digital Fault Locator for Overhead Transmission Lines*, Proceedings IEE, 126, nº 11, Novembro, pp 1181-1185.
- Schweitzer, E.O. e Jachinowski, J.K. (1981) *A Prototype Microprocessor-Based System for Transmission Line Protection and Monitoring*, Eight

Annual Western protective Relay Conference, Spokane, Washington, USA.

Schweitzer, O. (1982) *Evaluation and Development of Transmission Line Fault Locating Techniques which Use Sinusoidal Steady-State Information*, Ninth Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, USA.

Takagi, T.; Yamakoshi, Y.; Baba, J.; Uemura, T.; 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 Systems, Vol. PAS-100, Nº 3, Março.

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, PAS-101, nº 8, Agosto, pp 2892-2898.

Wedephol, L.M. (1963) *Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Poly-Phase Systems*- Proc. IEE, 110, (12), pp 2200-2212.

Westlin, S.E. e Bubenko, J.A. (1976) *Newton-Raphson Technique Applied to the Fault Location Problem*, IEEE PES Summer Meeting, Portland, USA, Julho, pp 01-06.

Wiszniewski, A. (1983) *Accurate Fault Impedance Locating Algorithm*, Proceedings IEE, 130, Part C, 6, pp 311-314.