UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MELINDA CESIANARA SILVA DA CRUZ

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE MÚLTIPLOS TERMINAIS A PARTIR DE REGISTROS OSCILOGRÁFICOS SINCRONIZADOS VIA TRANSFORMADA WAVELET

NATAL, RN, AGOSTO DE 2010

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE MÚLTIPLOS TERMINAIS A PARTIR DE REGISTROS OSCILOGRÁFICOS SINCRONIZADOS VIA TRANSFORMADA WAVELET

MELINDA CESIANARA SILVA DA CRUZ

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Júnior

Co-orientador: Prof. D. Sc. Marcos Antonio Dias de Almeida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

NATAL, RN, AGOSTO DE 2010

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE MÚLTIPLOS TERMINAIS A PARTIR DE REGISTROS OSCILOGRÁFICOS SINCRONIZADOS VIA TRANSFORMADA WAVELET

MELINDA CESIANARA SILVA DA CRUZ

Dissertação de Mestrado aprovada em 06 de Agosto de 2010 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Júnior (Orientador)

Prof. D. Sc. Marcos Antonio Dias de Almeida (Co-orientador)

Prof. Dra. Sc. Crisluci Karina Souza Santos Cândido (Examinador Interno)

Prof. Dr. Denis Vinicius Coury (Examinador Externo)

Prof. Dr. Sc. Fabiano Fragoso Costa (Examinador Interno)

Dr. José Júlio de Almeida Lins Leitão (Examinador Externo)

NATAL, RN, AGOSTO DE 2010

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida que me proporcionou e por ter me iluminado nos momentos difíceis.

Aos meus pais, João e Jocélia, pelo apoio constante e por sempre terem priorizado em suas vidas a minha educação. Foram os esforços, carinho e confiança deles que me incentivaram a alcançar meus objetivos.

Aos meus familiares, em especial a minha tia Francineide pelo apoio fundamental na minha etapa de estudos.

Ao meu marido, Evantuy, pelo carinho, compreensão e por tornar meus dias mais felizes.

Ao meu orientador, professor Firmino, e co-orientador, professor Marcos, pelos conhecimentos compartilhados, paciência e incentivo, essenciais para finalização deste trabalho.

Aos professores Crisluci Karina Souza Santos Cândido e José Tavares de Oliveira pela disponibilidade e ajuda importantíssimas na obtenção dos resultados apresentados nessa Dissertação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À CHESF pelas informações fornecidas.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

A energia elétrica é indispensável para o desenvolvimento da sociedade moderna e sua crescente demanda nos últimos anos, fruto dos crescimentos populacional e econômico, fez com que as concessionárias se tornassem mais comprometidas com a qualidade e a continuidade do fornecimento, fatores que são regulamentados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Para que esses fatores sejam atendidos quando ocorre uma falta permanente no sistema, faz-se necessária, primeiramente, uma rápida localização do defeito causador da interrupção da energia, o que não é uma tarefa tão simples devido à complexidade dos sistemas atuais. Um exemplo disso ocorre nas linhas de transmissão com múltiplos terminais, que interligam circuitos existentes com objetivo de atender à demanda. Nestas linhas, derivações para atender a cargas de porte que não justificam economicamente a construção de novas subestações são adotadas como medidas viáveis para aliviar outros circuitos. Este trabalho propõe um algoritmo de localização de faltas que é aplicado em linhas de transmissão com múltiplos terminais – dois e três terminais. O método de localização baseia-se no uso de fasores fundamentais de tensão e corrente, bem como na representação da linha através de sua impedância série. A Transformada Wavelet é uma ferramenta matemática eficaz na análise de descontinuidades de sinais e, por este motivo, é utilizada na sincronização dos dados de tensão e corrente oriundos de faltas. A transformada de Fourier é outra ferramenta utilizada neste trabalho para extração dos fasores fundamentais de tensão e corrente. Para testar e validar a aplicabilidade do algoritmo de localização, utilizaram-se dados de sinais faltosos simulados no ATP (*Alternative Transients Program*) e também dados reais obtidos de registradores oscilográficos instalados em linhas da CHESF.

Palavras-chave: Localização de faltas, Linhas de Transmissão de múltiplos terminais, Transformada Wavelet.

ABSTRACT

The electric energy is essential to the development of modern society and its increasing demand in recent years, effect from population and economic growth, becomes the companies more interested in the quality and continuity of supply, factors regulated by ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). These factors must be attended when a permanent fault occurs in the system, where the defect location that caused the power interruption should be identified quickly, which is not a simple assignment because the current systems complexity. An example of this occurs in multiple terminals transmission lines, which interconnect existing circuits to feed the demand. These transmission lines have been adopted as a feasible solution to suply loads of magnitudes that do not justify economically the construction of new substations. This paper presents a fault location algorithm for multiple terminals transmission lines - two and three terminals. The location method is based on the use of voltage and current fundamental phasors, as well as the representation of the line through its series impedance. The wavelet transform is an effective mathematical tool in signals analysis with discontinuities and, therefore, is used to synchronize voltage and current data. The Fourier transform is another tool used in this work for extract voltage and current fundamental phasors. Tests to validate the location algorithm applicability used data from faulty signals simulated in ATP (Alternative Transients Program) as well as real data obtained from oscillographic recorders installed on CHESF's lines.

Keywords: Fault Location, Multiple Terminal Transmission Lines, Wavelet Transform.

SUMÁRIO

RESUMO v
ABSTRACT vi
LISTA DE FIGURAS x
LISTA DE TABELAS xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS xiii

CAPÍTULO 1: Introdução 1
1.1. Localização de Faltas em Sistemas de Energia Elétrica: caracterização do problema 1
1.2. Objetivos 4
1.3. Estado da Arte 4
1.4. Conclusão 10

CAPÍTULO 2: Teoria Básica da Transformada Wavelet 11
2.1. Introdução 11
2.2. Transformada Wavelet 12
2.3. Transformada Wavelet Discreta 13
2.4. Análise multiresolução e Algoritmo de Mallat 13
2.5. Famílias Wavelets 16
2.6. Conclusão 19

CAPÍTULO 3: Metodologia para Identificação do Instante de Início da Falta e Estimação das Componentes Fundamentais Sincronizadas 20
3.1. Introdução 20
3.2. Os dados de Entrada 21
3.2.1. Obtenção dos sinais de entrada 21
3.2.1.1. Sinais Registrados 22
3.2.1.2. Sinais Simulados 23
3.3. O algoritmo de Identificação do Instante de Início da Falta 24

3.3.1. Etapa 1: Decomposição dos sinais em níveis pela Transformada Wavelet 25
3.3.2. Redução de ruído nos coeficientes wavelet 27
3.3.3. Detecção do início da falta 28
3.4. Considerações sobre o método de sincronização de dados 29
3.5. Obtenção dos fasores fundamentais de tensão e corrente sincronizados 30
3.6. Conclusão 31

CAPÍTULO 4: Algoritmo para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão 32
4.1. Introdução 32
4.2. Localização de Faltas em linhas com dois terminais 33
4.3. Localização de Faltas em linhas com três terminais 34
4.3.1. Falta em L_1 35
4.3.2. Falta em L_2 37
4.3.3. Falta em L_3 38
4.4. Considerações sobre o método de localização 39
4.5. Implementação do algoritmo 39
4.6. Conclusão 39

CAPÍTULO 5: Aplicações e Resultados para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Dois e Três Terminais 40
5.1. Considerações iniciais 40
5.2. Considerações gerais 41
5.2.1. Erro de localização da Falta 41
5.2.2. Matriz de impedância série da linha 41
5.3. Localização de Faltas em linhas com dois terminais 42
5.3.1. Sistemas Elétricos Analisados 42
5.3.2. Resultados 44
5.4. Localização de Faltas em linhas com três terminais 46
5.4.1. Sistema Elétrico Analisado 46
5.4.2. Resultados 48
5.4.2.1.Considerações sobre os resultados apresentados 53

5.4.2.2.Análise dos resultados 53
5.5. Conclusão 54

CAPÍTULO 6: Conclusões 55
6.1. Conclusões 55
6.2. Recomendações 56

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 57

ANEXOS 61
ANEXO 1: O PADRÃO COMTRADE 61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Custos associados a interrupções de até um minuto para diferentes setores econômicos. 2
Figura 1.2 – Diagrama da linha de três terminais proposta por Liu *et al.* (2008). 9
Figura 2.1 - Estrutura da decomposição wavelet (AMR) proposta por Mallat. 14
Figura 2.2 - Exemplo da decomposição proposta por Mallat. 15
Figura 2.3 – Árvore de decomposição wavelet para três níveis. 16
Figura 2.4 – Wavelet haar. 17
Figura 2.5 – Wavelet Daubechies. 17
Figura 2.6 – Wavelet Coiflets. 18
Figura 2.7 – Wavelet Symlets. 18
Figura 3.1 – Diagrama esquemático das etapas desenvolvidas no trabalho. 21
Figura 3.2 – Gráfico de corrente obtido para um sinal registrado pela oscilografia (256 amostras/ciclo) para uma falta fase-terra. 22
Figura 3.3 – Trecho de um sistema de transmissão de três terminais – ambiente ATP-Draw. 23
Figura 3.4 – Gráfico de correntes trifásicas obtidas com o ATP para uma falta fase A-terra. 24
Figura 3.5 – Decomposição de um sinal em 4 níveis. Em (a) Sinal original. De (b) a (e) detalhes do nível 1 ao 4. 26
Figura 3.6 – Sinal com indicação do instante de início da falta. 29
Figura 4.1 – Representação unifilar da linha de transmissão faltosa utilizada no equacionamento do algoritmo de dois terminais. 33
Figura 4.2 - Representação unifilar da linha de transmissão faltosa utilizada no equacionamento do algoritmo de três terminais. 35
Figura 5.1 – Sistema CHESF - Linha CGD – NTD – 04V3. 42
Figura 5.2 – Sistema CHESF - Linha LGZ – OLD – 05S4. 43
Figura 5.3 – Sinais de corrente trifásicos em um dos terminais da linha LGZ-OLD com indicação do ponto de incidência da falta fase B-terra. 44
Figura 5.4 – Sinais de corrente trifásicos em um dos terminais da linha CGD-NTD com indicação do ponto de incidência da falta fase C-terra. 45
Figura 5.5 - Configuração unifilar da linha de transmissão analisada. 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Parâmetros de seqüência – Linha CGD-STD 43
Tabela 5.2. Parâmetros de seqüência – Linha LGZ-OLD 43
Tabela 5.3. Resultados obtidos para localização de falta na linha LGZ-OLD. 45
Tabela 5.4. Resultados obtidos para localização de falta na linha CGD-NTD. 45
Tabela 5.5. Parâmetros de seqüência positiva adotados nas simulações das linhas de três terminais. 47
Tabela 5.6. Parâmetros de seqüência zero adotados nas simulações das linhas de três terminais. 47
Tabela 5.7. Parâmetros dos equivalentes de geração das barras S, R e T. 47
Tabela 5.8. Dimensão dos trechos L_1, L_2 e L_3 do sistema de três terminais simulado no ATP-Draw. 48
Tabela 5.9. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 0 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s. 49
Tabela 5.10. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 20 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s. 49
Tabela 5.11. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 50 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s. 50
Tabela 5.12. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 100 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s. 50
Tabela 5.13. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 0 Ω, ângulo de incidência de 90°, no instante 0,017 s. 51
Tabela 5.14. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 20, ângulo de incidência de 90°, no instante 0,017 s. 51
Tabela 5.15. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 50 Ω, ângulo de incidência de 90°, no

instante 0,017 s. 52

Tabela 5.16. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 100 Ω, ângulo de incidência de 90°, no instante 0,017 s. 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ATP: Alternative Transients Program

CHESF: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

GPS: Global Positioning System

EMTP: EletroMagnetic Transients Program

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

CC: corrente contínua

g(.): Função Wavelet

x(n): variável que representa um sinal discreto no tempo

a e b: parâmetros de escala e translação

cA: coeficientes de aproximação

cD: coeficientes de detalhe

$d_s(n)$: coeficiente wavelet de detalhe do nível s.

$d'_s(n)$: coeficiente wavelet sem ruído do detalhe de nível s.

η_s: limiar baseado no máximo valor absoluto dos coeficientes do nível s.

σ: desvio padrão

V_{abc} e I_{abc}: fasores de tensão e corrente trifásicos

VF_{abc}: tensão trifásica no ponto de falta

Z_{abc}: Matriz de impedância série da linha

Z_P: impedância própria da linha

Z_M: impedância mútua da linha

ZS, ZR e ZT: impedância das fontes geradoras nos terminais S, R e T

a, b, c: fases da linha

p_i: ponto de início da falta

L: comprimento da linha

L_1, L_2 e L_3: trechos da linha em que podem ocorrer faltas.

D e D': distância ao ponto de falta

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Localização de Faltas em Sistemas de Energia Elétrica: caracterização do problema

A localização de faltas em linhas de transmissão é um assunto que já vem sendo estudado há algum tempo e muitas propostas com diversos tipos de abordagens têm sido feitas (TAKAGI *el al.* (1982), JOHNS & JAMALI (1990), BRAHMA (2005)). Isto se deve à importância que a energia elétrica desempenha dentro da sociedade moderna, visto que a sua presença contínua é o que faz mover os centros comerciais, industriais e residenciais, sendo, pois, capaz de impulsionar o desenvolvimento dos povos e também da economia.

Dessa forma, é interessante que o sistema elétrico transmita com um alto nível de confiabilidade para que a continuidade no fornecimento de energia seja a máxima possível, ou seja, apresente curto intervalo de tempo de indisponibilidade; seja capaz de retornar ao estado normal de operação após uma falha no sistema; e também seja capaz de manter-se funcionando por mais tempo, inibindo as falhas devido ao desgaste dos equipamentos e evitando a ocorrência de perdas, tanto do consumidor quanto da empresa concessionária.

Para exemplificar os impactos econômicos das faltas permanentes nos sistemas de energia, a Figura 1.1 mostra os custos relacionados a interrupções de até um minuto para diferentes setores da economia.

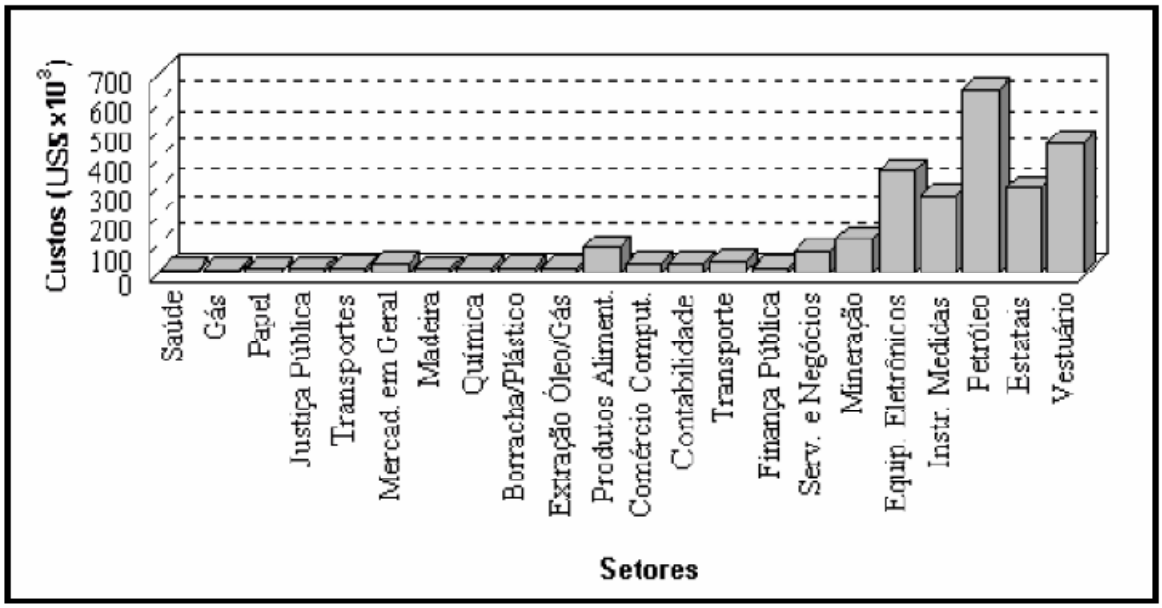

Figura 1.1 – Custos associados a interrupções de até um minuto para diferentes setores econômicos. Fonte: (OLIVEIRA, 2000).

Todo sistema de energia está sujeito a interrupções no fornecimento devido a problemas tanto internos (curtos-circuitos) quanto externos (descargas atmosféricas). Nesse contexto, as linhas de transmissão representam o elemento do sistema mais susceptível à ocorrência de problemas, principalmente devido a sua dimensão e ao ambiente em que se encontram, fatores que dificultam a manutenção e o monitoramento (COURY *et al*., 2007).

O sistema elétrico brasileiro é formado por inúmeras linhas de transmissão, visto que existe a necessidade de interligar os centros de consumo aos centros de geração, os quais estão geralmente distantes. Quando ocorre um defeito permanente em uma dessas linhas, o trabalho das equipes de manutenção para localizar o ponto de falta é habitualmente demorado, uma vez que não se sabe exatamente qual o trecho onde o defeito ocorreu. Isso implica no aumento nos custos previstos para manutenção das linhas de transmissão e na redução da confiabilidade do sistema.

É nesse aspecto que um localizador de faltas auxilia na operação, determinando o mais precisamente possível o ponto de ocorrência da falta. Isso acarretará um menor tempo para que as equipes de manutenção encontrem o defeito, corrijam-no e restaurem o sistema, aumentando assim a confiabilidade do fornecimento e diminuindo as perdas financeiras que são acarretadas pela ausência da energia elétrica. Localizadores de falta também têm a função de estimar pontos fracos do sistema, visto que podem registrar todas as faltas transitórias que indicam fontes de possíveis transtornos futuros.

Os algoritmos ou métodos de localização de faltas têm sido classificados em duas categorias, podendo ser aplicados a sistemas que utilizam dados fornecidos por um ou múltiplos terminais:

- Métodos baseados em componentes de freqüência fundamental;
- Métodos baseados em componentes de alta freqüência;

O método que se baseia em componentes de freqüência fundamental foi adotado neste trabalho. Genericamente, este método utiliza, para determinar a localização da falta, fasores fundamentais (60 Hz) de tensão e corrente, os quais são extraídos dos sinais registrados em um ou em múltiplos terminais através de uma técnica de filtragem (que pode ser Fourier, Mínimos quadrados, Kalman, etc). Estes fasores serão aplicados no algoritmo de localização que fornecerá, pois, a distância entre a falta e o terminal considerado.

Diversas abordagens são feitas com relação à localização de faltas em linhas com dois terminais. No entanto, o crescente aumento em complexidade dos sistemas elétricos de potência, devido à demanda de energia e à interligação dos sistemas existentes, torna comum o emprego das linhas com três ou mais terminais. Estas linhas, embora atrativas do ponto de vista econômico e ambiental, apresentam um grau de complexidade maior, visto que a inclusão de uma alimentação intermediária pode afetar o processo de localização, bem como a sua proteção. Isso exige o emprego de algoritmos especiais para a localização das faltas.

1.2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Desenvolver e verificar a viabilidade de um algoritmo de localização de faltas para linhas de transmissão com dois e três terminais, levando em consideração o método que usa componentes fundamentais de tensão e corrente.
- Apresentar uma técnica de identificação do instante de início da falta nos diversos terminais de uma linha de transmissão. Esta é uma técnica que amplia a aplicabilidade do algoritmo para dados de entradas que não estejam sincronizados. Dessa forma, pretende-se contribuir com uma nova proposta de sincronização dos registros a serem utilizados no algoritmo de localização de faltas. Utiliza-se a Transformada Wavelet para detecção dos pontos de incidência da falta.
- Utilizar a Transformada Discreta de Fourier para extração dos fasores fundamentais de tensão e corrente.
- Utilizar uma base de dados de sinais de tensão e corrente obtidos de sistemas simulados no programa ATP *(Alternative Transients Program)* e de registradores oscilográficos instalados em sistemas reais de transmissão.
- Avaliar a exatidão do cálculo da localização de faltas para três terminais, considerando a influência de diferentes parâmetros como resistência de falta, distância de falta e ângulo de incidência.

1.3. Estado da Arte

Abaixo segue um breve estudo sobre algumas publicações que utilizam o tema proposto neste trabalho, que é a localização de faltas em linhas de transmissão com dados provenientes de dois ou de três terminais.

JOHNS e JAMALI (1990) descreveram uma técnica de localização de faltas em linhas de transmissão que usa fasores fundamentais em regime permanente de sinais de tensões e correntes pós-falta de ambos os terminais da linha. A representação da linha foi

feita através de parâmetros distribuídos. O equacionamento do algoritmo está descrito a seguir e a expressão final para o cálculo da distância da falta é dada pela equação (1.3).

$$V_F = \cosh(\gamma x)\, V_S - Z_0 \sinh(\gamma x)\, I_S \tag{1.1}$$

$$V_F = \cosh[\gamma(L - x)]\, V_R - Z_0 \sinh[\gamma(L - x)]\, I_R \tag{1.2}$$

Nas equações (1.1) e (1.2), tem-se que:

V_F: tensão pós falta em regime permanente.

Z_0: impedância característica da linha.

γ: constante de propagação da linha.

L: comprimento total da linha.

x: distância à falta.

V_S e V_R: fasores de tensão nos terminais S e R de uma linha de transmissão de dois terminais, respectivamente.

I_S e I_R: fasores de corrente nos terminais S e R de uma linha de transmissão de dois terminais, respectivamente.

A partir das equações (1.1) e (1.2), obtém-se:

$$x = \frac{\operatorname{arctanh}\left(-{}^{B}/_{A}\right)}{\gamma} \tag{1.3}$$

Na equação (1.3), tem-se que::

$$A = Z_0 \cosh(\gamma L)\, I_R - \sinh(\gamma L) V_R + Z_0 I_S \tag{1.4}$$

$$B = \cosh(\gamma L) V_R - Z_0 \sinh(\gamma L)\, I_R - V_S \tag{1.5}$$

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

KALAM e JOHNS (1991) propuseram uma técnica de localização de faltas em linhas de três terminais a partir das idéias de JOHNS e JAMALI (1990). Dados de tensão e corrente são medidos nos três terminais e posteriormente são filtrados de maneira a produzir uma medida dos fasores fundamentais em regime permanente. A precisão não é significativamente afetada pela resistência e tipo da falta, bem como pela impedância da fonte. O algoritmo não requer um pré-conhecimento da seção na qual a falta ocorreu e também não considera erros introduzidos por hardwares e/ou transdutores na precisão dos resultados.

GIRGIS *et al.* (1992) propuseram um algoritmo de localização de faltas em linhas com dois terminais que se estende para linhas com três terminais, sendo independente de fatores como resistência de falta e tipo de falta. O método representa a linha de transmissão através de sua impedância série, desprezando sua capacitância shunt, e utiliza fasores fundamentais trifásicos de tensão e corrente para determinar a distância de faltas que podem ocorrer no sistema de energia. Os autores apresentam um equacionamento específico para dados de entrada sincronizados, e outro para dados não sincronizados, sendo este último constituído por um processo iterativo que objetiva encontrar tanto a distância de falta quanto o ângulo de sincronização entre a barra de referência e as demais barras do sistema. Utilizou-se este método de localização de faltas nesta dissertação.

AGGARWAL *et al*. (1993) apresentaram um método para a localização das faltas em linhas de transmissão de três terminais a partir dos estudos de JOHNS e JAMALI (1990). A técnica é baseada na utilização das formas de onda de tensão e corrente em todos os terminais de uma linha de três terminais, sendo as formas de onda filtradas pela técnica da Transformada Discreta de Fourier, com o objetivo de extrair fasores fundamentais de tensão e corrente em regime permanente. O método faz uso da teoria da superposição, da teoria modal e considera que os dados provenientes dos três terminais estejam sincronizados. A técnica é virtualmente independente da resistência de falta e das variações na impedância da fonte e configurações da linha, inclusive quanto à transposição. Os resultados apresentados pelos autores mostram que o método tem boa precisão para as condições analisadas.

Em NOVOSEL *at al.* (1996) é apresentada uma proposta de localização que usa fasores de tensão e corrente não-sincronizados de dois terminais da linha. Primeiramente,

busca-se determinar o valor do ângulo de sincronização entre os sinais envolvidos. Para isso utiliza-se o método iterativo de Newton-Raphson, que compara a diferença do ângulo calculado entre duas iterações sucessivas com um valor de erro pré-estabelecido. Sendo a diferença calculada menor que o erro, o processo iterativo converge, determinando o ângulo que fará a sincronização dos fasores dos dois terminais da linha. O método requer uma estimativa inicial do ângulo de sincronização, fator que não representa um problema, segundo os autores, em virtude da rápida convergência em diversos testes realizados considerando-se a incógnita com valor inicial zero. A metodologia utiliza ainda circuitos de seqüência no desenvolvimento do equacionamento e mostra-se preciso com erros inferiores a 1% quanto a variações de tipo e resistência de falta.

Outra abordagem baseada em medidas não-sincronizadas é apresentada por ZAMORA *et al.* (1996). Tal técnica utiliza o princípio da superposição, considerando apenas fasores de tensão de pré-falta e de pós-falta. A modelagem empregada utiliza o modelo π de uma rede de seqüência positiva. A estimação da localização da falta é obtida através de uma variável denominada fator de distância, k_v, definida pela equação (1.6).

$$k_v = \left|\frac{V_{S1}}{V_{R1}}\right| \tag{1.6}$$

As variáveis V_{S1} e V_{R1} são as tensões de seqüência positiva dos terminais S e R da rede de dois terminais em falta. Essas tensões dependem de todas as impedâncias do modelo e da própria distância *d* ao ponto de falta. O método é independente da resistência de falta e do tipo de falta. Apresentou erro máximo de 2.25% quando a situação de erros nas medições de tensão foram assumidas.

GONG *et. al.*(2000) desenvolveram um algoritmo de localização de faltas que utiliza sinais de tensão e corrente provenientes de dois ou três terminais. O equacionamento do algoritmo é feito por meio de equações diferencias, onde o efeito da resistência de falta é completamente eliminado. A proposta faz uso de GPS (*Global Positioning System*) para uma ideal sincronização dos dados, que são transferidos através do uso de modem e linha telefônica.

ELHAFFAR & LEHTONEN (2004) mostraram a investigação do problema de localização de faltas utilizando os transitórios dos sinais de corrente obtidos em um

terminal da LT. O método discutido utiliza a decomposição em componentes modais, bem como a Transformada Wavelet para evidenciar os componentes de alta freqüência. A distância da falta é encontrada a partir do conhecimento da velocidade das ondas viajantes e do intervalo de tempo entre duas reflexões no modo aéreo. Simulações realizadas com uma LT de dois terminais confirmaram boa correlação entre os valores estimados e os valores verdadeiros das distâncias das faltas.

BRAHMA (2005) apresentou um algoritmo que faz a identificação do ramo faltoso e depois executa a localização de falta em linhas com múltiplos terminais. A primeira etapa consiste de uma análise de medições sincronizadas de corrente e tensão em todos os terminais, na qual a diferença da tensão entre as barras conectadas a certo trecho é que o identifica como faltoso. A segunda etapa do algoritmo, a de localização, usa apenas medições sincronizadas de tensão em todos os terminais. Relata-se que erros oriundos de transformadores de corrente, quando estes não ultrapassam os 10%, não interferem na precisão do algoritmo. Outros fatores que não afetam significativamente a precisão do algoritmo, de acordo com os resultados apresentados, são a resistência e o tipo de falta.

Também foi apresentado por BRAHMA (2006) um esquema para localização de faltas em linhas com dois terminais. Trata-se de um método iterativo que usa as propriedades da matriz Zbarra, bem como medições sincronizadas de ambos os terminais da linha. Necessita de informações da impedância da fonte, que são calculadas pelo uso de componentes de seqüência positiva dos fasores de tensão e corrente de pré e pós falta.Os resultados apresentados são oriundos de simulações no software EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*), onde diferentes tipos de falta, resistência e distância de falta foram avaliados.

TERZIJA & RADOJEVIÉ (2006) propuseram um algoritmo para localização e análise de faltas em linhas que possuem dados provenientes de dois terminais da linha. Para isso, utilizam uma modelagem matemática da resistência do arco elétrico na falta, a qual é calculada utilizando as componentes harmônicas dos sinais de tensão e corrente, obtidas pela Transformada Discreta de Fourier. Dependendo da amplitude encontrada para a resistência, o algoritmo determina se a falta é permanente ou transitória. O método utiliza dados que são medidos e sincronizados por PMUs (Unidades de Medição Fasorial) instalados nos dois terminais da linha.

Outra técnica para localização de faltas é proposta por Liu *et al.* (2008) para linhas de transmissão com N-terminais (N >= 3). Utiliza PMUs e aplica o método de localização de faltas de dois terminais nas linhas de transmissão que possuem N terminais, indicando a seção da linha que ocorreu a falta e a sua localização. O método pode ainda ser incorporado a outros métodos (desde que estes usem dados de tensão e corrente sincronizados) que utilizam a técnica de localização de faltas de dois terminais, podendo, pois, estendê-la para N. A técnica é aplicável a linhas de transmissão que possuem qualquer tipo de configuração. Para o caso de uma linha de transmissão com três terminais tem-se a configuração da Figura 1.2. Nesta, um dos terminais é adotado como referência (R) e índices (D) calculados com relação ao ponto P é que determinam se a falta ocorreu nos trechos S-P, T-P ou P-R, bem como determinam a exata localização da falta.

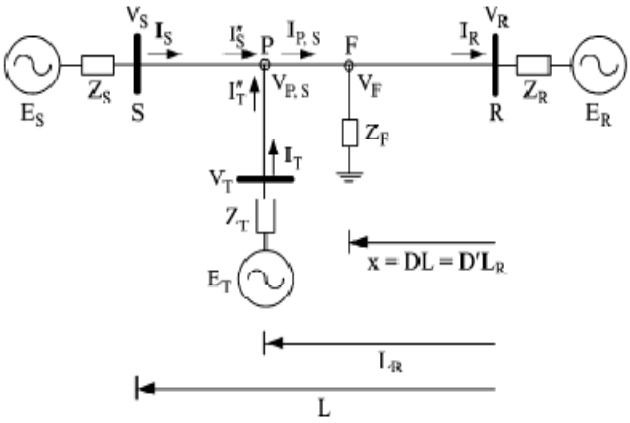

Figura 1.2 – Diagrama da linha de três terminais proposta por Liu *et al.* (2008).

SILVA *et al.* (2008) descreveram um algoritmo para localização de faltas em linhas com três terminais baseado tanto nas componentes de alta freqüência do sinal faltoso, quanto nas componentes de baixa freqüência. Trata-se de um algoritmo que se ajusta aos dados apresentados e "decide" de acordo com o nível de ruído do sinal se a localização deve ser feita através do método por ondas viajantes ou pelo método da freqüência fundamental. A Transformada Wavelet é usada para extrair os componentes de alta e baixa freqüência. Os dados dos três terminais devem estar sincronizados.

CHE e LIANG (2009) propuseram um método de localização que inclui um módulo para estimação de parâmetros, visando resolver o problema da variação dos

parâmetros da linha na detecção do ponto de falta. Segundo os autores os parâmetros da linha não são constantes todo tempo, variando devido a diferentes condições ambientais, e isso influencia muito no processo de localização de faltas. Utiliza-se no algoritmo de localização uma abordagem baseada em fasores fundamentais de tensão e corrente.

LIAO e KANG (2009) apresentaram uma técnica de localização de faltas para dois terminais que não utiliza parâmetros da linha de transmissão. As tensões e correntes de ambos os terminais são as entradas do algoritmo e assume-se que estas medidas não estão sincronizadas. Existem duas propostas para localização de faltas, uma que utiliza dados de falta e pré-falta e a outra que utiliza apenas dados de falta. Nas duas abordagens implementa-se um processo iterativo que resulta como respostas a distância de falta, o ângulo de sincronização das medições nos dois terminais e os parâmetros da linha. Os resultados, que foram obtidos de simulações no EMTP, mostram que as duas técnicas são eficientes para localizar faltas. O método é baseado em um modelo de linha com parâmetros distribuídos e é independente das impedâncias de falta e da fonte.

1.4. Conclusão

Este capítulo apresentou uma introdução a respeito do tema proposto neste trabalho, que consiste na localização de faltas em linhas de transmissão de múltiplos terminais. Considerações sobre os motivos que levaram à escolha do tema proposto, os principais objetivos e uma revisão bibliográfica sobre os estudos relacionados ao assunto também foram abordados. A análise dos trabalhos pesquisados demonstra que apenas um pequeno número de pesquisadores teve a preocupação de realizar uma sincronização prévia dos dados registrados, desenvolvendo algoritmos para situações em que há uma suposta sincronização. Dessa forma, o presente trabalho pretende contribuir com uma nova proposta de sincronização, via software, para os registros a serem utilizados nos algoritmos de localização de faltas.

CAPÍTULO 2

Teoria Básica da Transformada Wavelet

2.1. Introdução

Wavelets são ferramentas utilizadas para representar dados ou outras funções, sendo empregadas nas mais diversas áreas do conhecimento. O termo "wavelets" significa "pequenas ondas", que está associado ao fato delas serem oscilatórias e de curta duração. Utilizam a idéia de aproximação usando a superposição de funções, que tem origem no trabalho de Joseph Fourier, que no século XIX descobriu que poderia utilizar senos e cossenos para representar outras funções.

Por muitas décadas, os cientistas procuraram funções mais apropriadas do que senos e cossenos para análise de sinais, pois as bases das funções de Fourier são impróprias para o tratamento local dos dados por serem séries infinitas e não se adaptarem às análises de dados descontínuos. As wavelets além de aproximarem funções finitas, também servem para analisar dados com descontinuidades abruptas (GRAPS, 1995).

A idéia principal da análise wavelet é caracterizar um sinal de acordo com a escala. Esta escala utilizada para analisar um sinal representa uma janela de tempo, a qual pode ser

larga ou estreita. A janela larga (grande escala) apresenta características globais do sinal, com comportamento regido pelas baixas freqüências. De forma análoga, a janela estreita (pequena escala), apresenta características mais detalhadas, comportamento regido pelas altas freqüências.

Dessa forma, a análise wavelet é capaz de revelar certos aspectos dos sinais que outras técnicas de análise não conseguem, como por exemplo, pequenas descontinuidades, impulsos ou transitórios de alta freqüência, eventos típicos de sinais existentes em sistemas elétricos. É devido a este fato que, neste trabalho, empregou-se esta ferramenta para detectar o instante de início de curtos-circuitos, visto que os sinais de tensão e corrente presentes nestes eventos são afetados por componentes de alta freqüência, que são amortecidas em curto intervalo de tempo.

2.2. Transformada Wavelet

Define-se a Transformada Wavelet como sendo uma operação linear que decompõe o sinal em diferentes escalas ou diferentes níveis de resolução, ou seja, permite decompor um sinal em diferentes componentes de freqüência, possibilitando assim, estudar cada componente separadamente em sua escala correspondente. É utilizada para analisar sinais, assim como a Transformada de Fourier. No entanto, na Transformada Wavelet é possível ter uma visão tanto global, quanto localizada do que se deseja analisar, já que decompõe o sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução, a partir de um único sinal de entrada (GRAPS, 1995).

É importante observar que tanto a Transformada de Fourier quanto a Transformada Wavelet são transformações de uma função para um domínio diferente. Para a Transformada de Fourier, esse novo domínio tem como funções de base senos e cossenos. Já para a Wavelet, o novo domínio contém funções de base que são um pouco mais complexas, chamadas de wavelets mãe. Há muitos tipos de wavelets mãe, sendo algumas delas: Haar, Symmlet, Daubechies e Coiflet.

A Transformada Wavelet existe nas suas formas discreta (definida no tempo discreto) e contínua (definida no tempo contínuo). Os sinais analisados neste trabalho estão

definidos no tempo discreto, logo a Transformada Wavelet Discreta será usada para analisar os sinais envolvidos.

2.3. Transformada Wavelet Discreta

Para o tratamento de um sinal discreto *x*(*n*) é necessário utilizar a Transformada Wavelet Discreta. Esta pode ser definida pela seguinte equação (COURY *et al.*, 2007):

$$TWD(m,k) = \frac{1}{\sqrt{{a_0}^m}} \sum_n x(n) g\left(\frac{k - n b_0 {a_0}^m}{{a_0}^m}\right) \tag{2.1}$$

Na equação (2.1), *g(.)* é a Wavelet mãe; *x(n)* é o sinal discretizado; *k* é uma variável inteira que representa o número de amostras do sinal de entrada; *a* e *b* são os parâmetros de escala e translação, respectivamente, e são funções de um parâmetro inteiro *m*, isto é, $a = {a_0}^m$ e $b = n b_0 {a_0}^m$, que permite uma expansão da família originada pela Wavelet mãe, gerando as Wavelets filhas. Os coeficientes da Transformada Wavelet em uma determinada escala e translação indicam a combinação que existe entre o sinal de entrada *x(n)* e a wavelet mãe (escalada e transladada).

Os parâmetros de escala estão relacionados à compressão ou expansão da wavelet de acordo com o tamanho da janela (escala). Os parâmetros de translação estão relacionados ao deslocamento da wavelet no eixo das abscissas.

Na prática, usam-se algoritmos para obter a Transformada Wavelet, sendo o tradicional algoritmo de Mallat uma forma muito empregada para a realização dessa operação.

2.4. Análise multiresolução e Algoritmo de Mallat

O objetivo da análise multiresolução é representar uma dada função em diferentes níveis de resolução wavelet. Com esta análise é possível obter uma boa resolução no tempo e em freqüência, que se torna útil pelo fato de que os sinais encontrados em aplicações

práticas geralmente apresentam componentes de alta freqüência por curtas durações de tempo e componentes de baixa freqüência por longa duração de tempo (SANTOS, 2004).

A análise multiresolução (AMR) refere-se, especificamente, ao procedimento para se obter aproximações, de filtros passa baixa, e detalhes, de filtros passa alta do sinal original. A aproximação compreende as baixas freqüências do sinal original, enquanto o detalhe engloba o conteúdo de alta freqüência do sinal original.

O algoritmo de Mallat (MALLAT, 1989) está diretamente relacionado à análise multiresolução, pois descreve um processo de decomposição em níveis que é bastante empregado, tanto que os termos Transformada Wavelet Discreta e análise multiresolução se referem especificamente ao seu algoritmo, embora outros esquemas de transformação discreta existam (MACHADO (2006), CANDIDO (2008)). A decomposição em níveis corresponde a uma decomposição hierárquica composta de um conjunto de aproximações e detalhes, onde em cada nível hierárquico os escalonamentos são uma potência de dois. Dessa forma, o esquema de transformação discreta proposto por Mallat em 1988 opera com escalas e posições baseadas em potências de dois (escalas e posições diádicas) e considera o uso de filtros. A Figura 2.1 ilustra a decomposição de um sinal através do bloco básico do algoritmo de Mallat.

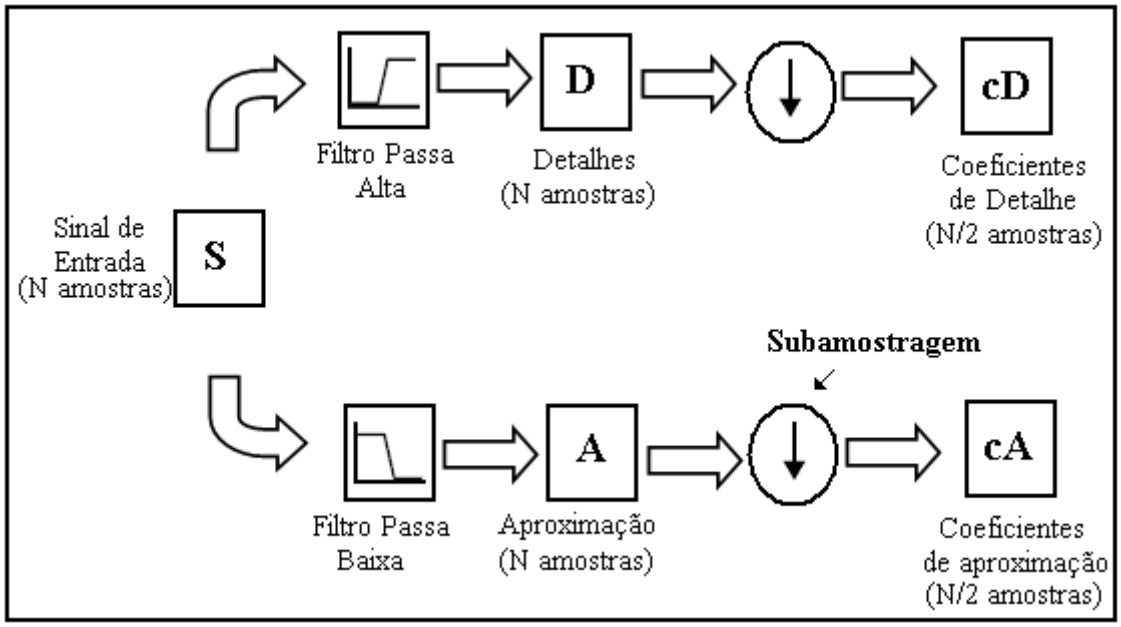

Figura 2.1 - Estrutura da decomposição wavelet (AMR) proposta por Mallat.

O processo de decomposição de um determinado sinal de entrada baseia-se na filtragem desse sinal, através de filtros passa alta (H) e passa baixa (L), os quais fornecem versões aproximadas e detalhadas do sinal original.

O filtro passa baixa L tem o efeito de "suavizar" o sinal, gerando a sua aproximação. O filtro passa alta H retém a parte de alta freqüência que é o detalhe do sinal, como se pode observar pelo um exemplo da Figura 2.2.

Os dois sinais resultantes do processo de filtragem, D e A, apresentam, cada um, o mesmo número de amostras N do sinal de entrada S. Ou seja, tem-se que a quantidade de dados de saída é o dobro da quantidade de dados iniciais (2N). A operação de subamostragem no esquema de Mallat tem a função de reduzir para N a soma do número de amostras dos sinais aproximados e detalhados, D e A, fazendo uma intercalação entre os dados (considera a primeira amostra, rejeita a segunda e assim por diante). Os sinais cA e cD resultantes do processo de subamostragem são os coeficientes da Transformada Wavelet Discreta. O processo em decomposição da Figura 2.1 pode ser iterado até que o sinal seja dividido em vários níveis de resolução. Este esquema é chamado de árvore de decomposição wavelet, ilustrado na Figura 2.3. Os coeficientes de aproximação são sempre usados para alimentar o próximo estágio da decomposição.

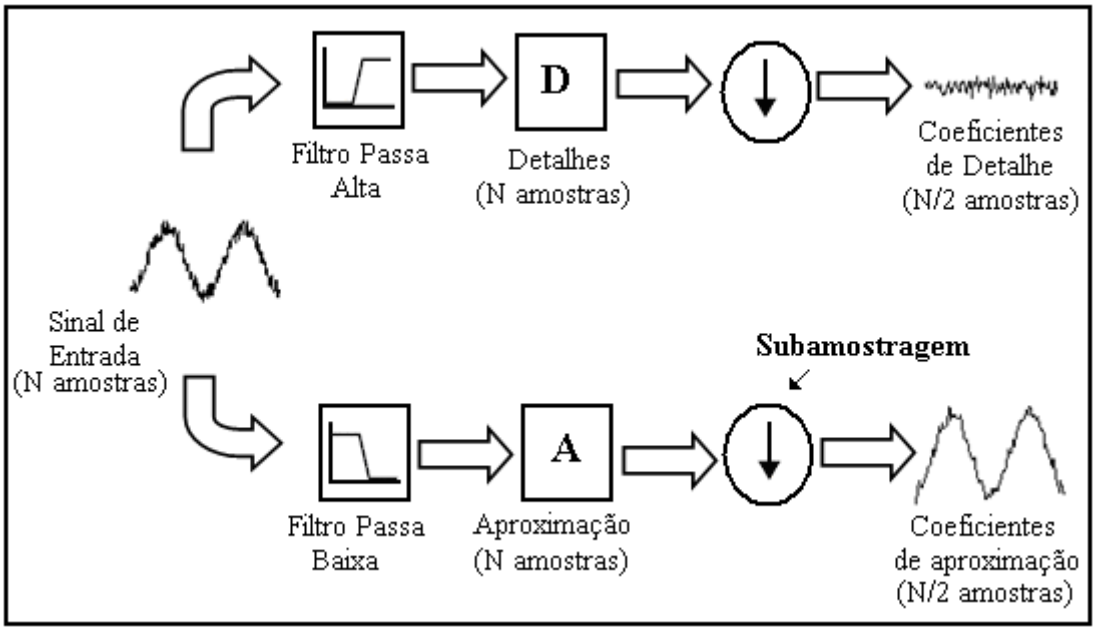

Figura 2.2 - Exemplo da decomposição proposta por Mallat.

Resumindo, na análise multiresolução, um sinal S é decomposto em coeficientes de aproximação A1 e coeficientes de detalhe D1 do nível 1. A aproximação do nível 1, A1, é, também, decomposta em coeficientes de aproximação A2 e coeficientes de detalhe D2 do nível 2. Este processo ocorre, de forma recursiva, até o n-ésimo nível de decomposição.

O número máximo de níveis de decomposição wavelet é determinado pelo número de amostras do sinal original. Para um sinal com N amostras, a máxima quantidade de níveis é dada por log_2N.

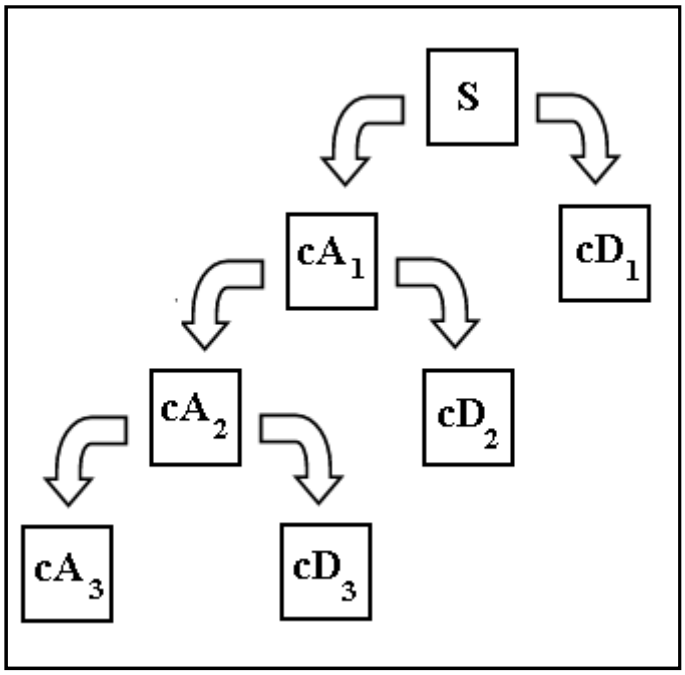

Figura 2.3 – Árvore de decomposição wavelet para três níveis.

2.5. Famílias Wavelets

Alguns pesquisadores definiram wavelets-mãe para, em função de fatores como suavidade, simetria, regularidade, dentre outros, criar famílias. Algumas famílias de wavelets são apresentadas a seguir, mostrando-se algumas de suas características e os gráficos das funções associadas (MISITI, 2007). Nas figuras 2.4 a 2.7, o eixo horizontal representa o tempo ou posição e o eixo vertical a amplitude das wavelets.

- Haar: A base de Haar é a primeira e mais simples das bases. Ela é descontínua, se parece com a função degrau e, também, equivale a Wavelet de Daubechies db1.

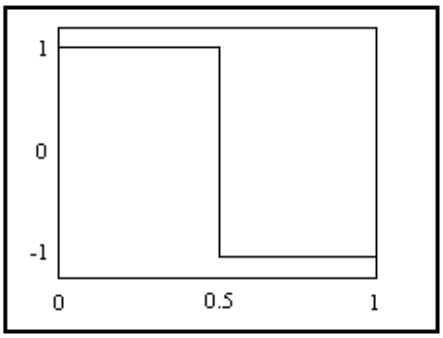

Figura 2.4 – Wavelet de Haar.
Fonte: (MISITI, 2007).

- Daubechies: A família de bases wavelet de Daubechies leva o sobrenome de Ingrid Daubecheis, uma das mais importantes pesquisadoras no campo das wavelets. O nome da família wavelet Daubechies é geralmente escrito por três caracteres como dbN, onde db é uma indicação de seu sobrenome (Daubecheis) e N é o número de sua ordem.

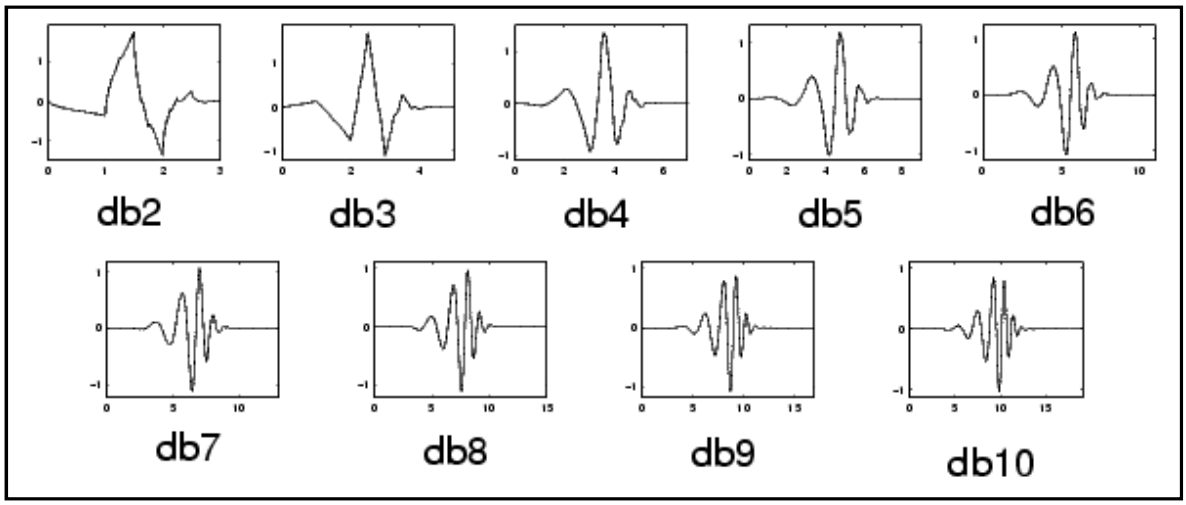

Figura 2.5 – Wavelet Daubechies.
Fonte: (MISITI, 2007).

- Coiflets: A wavelet de Coiflets é denominada pelo nome CoifN, onde Coif descreve seu nome e N é o número de sua ordem. As wavelets Coiflet são mais simétricas que as wavelets de daubechies. Alguns exemplos de wavelet Coiflet são mostrados na Figura 2.6.

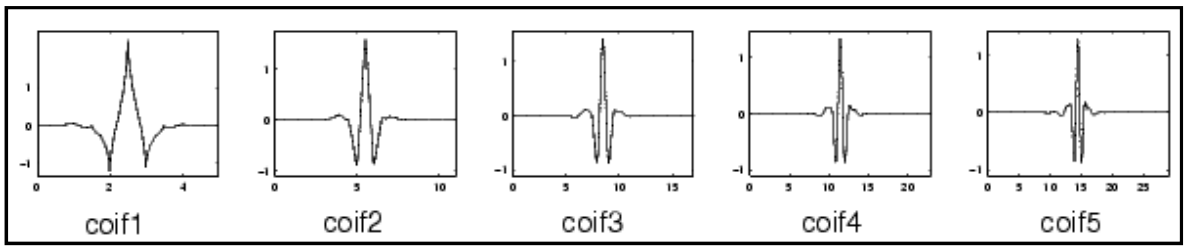

Figura 2.6 – Wavelet Coiflets.
Fonte: (MISITI, 2007).

- Symlets: SymN denomina a família wavelet Symlets, onde Sym é o nome e N é a ordem. As Symlets são próximas das wavelets simétricas propostas por Daubechies, como uma modificação da família db. As propriedades das duas famílias são similares.

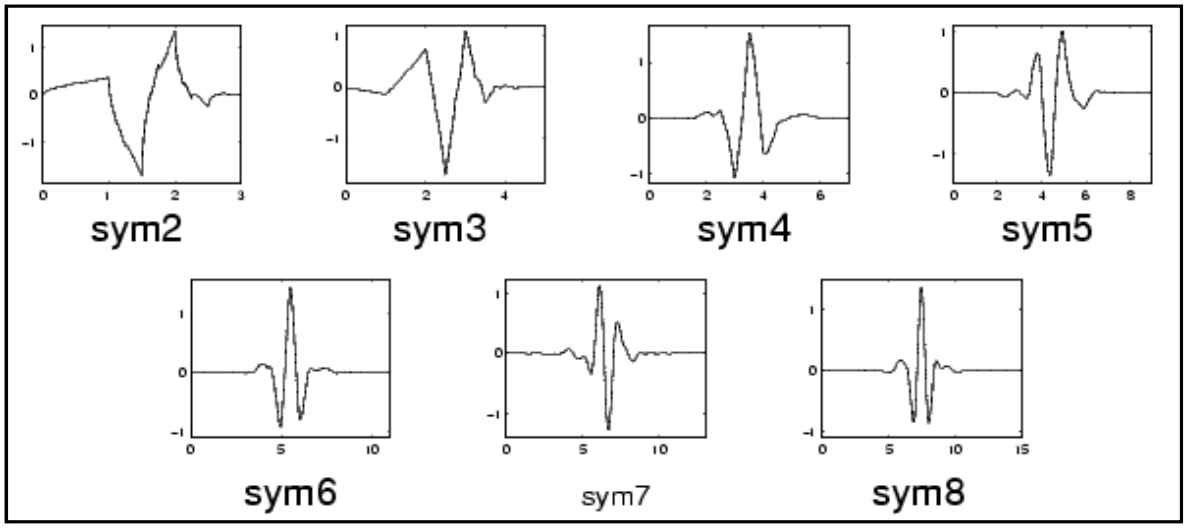

Figura 2.7 – Wavelet Symlets.
Fonte: (MISITI, 2007).

2.6. Conclusão

Este capítulo descreveu uma breve introdução sobre a análise wavelet e enfocou a teoria relacionada à obtenção da Transformada Wavelet em sua versão discreta, a qual é uma alternativa quando o interesse da análise não é apenas sobre o conteúdo espectral do sinal, mas também sobre a localização desse espectro no tempo. Apresentou-se ainda a análise multiresolução proposta por Mallat, um poderoso algoritmo para o cálculo iterativo da Transformada Wavelet Discreta, bem como as principais famílias wavelets.

CAPÍTULO 3

Metodologia para Identificação do Instante de Início da Falta e Estimação das Componentes Fundamentais Sincronizadas

3.1. Introdução

Este trabalho tem como objetivo a obtenção de um localizador de faltas eficiente para linhas de transmissão de dois e três terminais, que forneça o local da falta na linha com a maior precisão possível. Para isso, algumas etapas foram desenvolvidas, conforme mostra o esquema da Figura 3.1. A primeira etapa do trabalho consiste na obtenção dos sinais de tensão e corrente trifásicos que serão usados para localizar a falta na linha. Após a fase de obtenção dos sinais, a fase seguinte está relacionada ao tratamento desses dados. Os sinais registrados devem ser pré-processados de forma a se obter os fasores fundamentais sincronizados que serão aplicados ao algoritmo de localização de faltas na linha. Logo, o bloco de processamento do sinal refere-se às etapas de determinação do instante de início da falta e de extração das componentes fundamentais de tensão e corrente.

Figura 3.1 – Diagrama esquemático das etapas desenvolvidas no trabalho.

3.2. Os Dados de Entrada

Antes de apresentar o método de determinação do instante de início da falta proposto, descreve-se com mais detalhes a etapa de obtenção dos sinais de entrada, que são os dados que alimentarão a etapa de processamento do sinal.

3.2.1. Obtenção dos sinais de entrada

A base de dados utilizada neste trabalho é composta de sinais de tensão e de corrente característicos de faltas permanentes em linhas de transmissão. Estes dados são obtidos de equipamentos registradores instalados em sistemas reais de transmissão da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco) e além destes, foram usados também sinais obtidos por meio de simulações no *software* ATP. Os dados reais foram aplicados exclusivamente para localização de faltas em linhas com dois terminais, enquanto os dados simulados foram aplicados exclusivamente no algoritmo para três terminais.

O *software* ATP é um dos programas mais utilizados para simulação de transitórios eletromagnéticos em Sistemas de Energia Elétrica. É uma ferramenta poderosa e constitui uma evolução do programa EMTP, também bastante difundido (DOMMEL, 1995).

3.2.1.1. Sinais Registrados

Os sinais de tensão e corrente registrados foram obtidos através de registros oscilográficos do sistema de transmissão da CHESF. Esses dados são originalmente codificados no formato COMTRADE (ver anexo 1), padronizado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), e precisam ser decodificados para um formato padrão caso o acesso às informações seja feito por programas que não reconhecem este tipo de arquivo, como por exemplo o MATLAB®, software utilizado neste trabalho. A partir dos dados decodificados, verificou-se uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo para todos os sinais de tensão e corrente registrados. A título de exemplo, a Figura 3.2 mostra o gráfico obtido para um dos sinais de corrente registrados pela oscilografia contendo uma falta permanente em uma linha de transmissão.

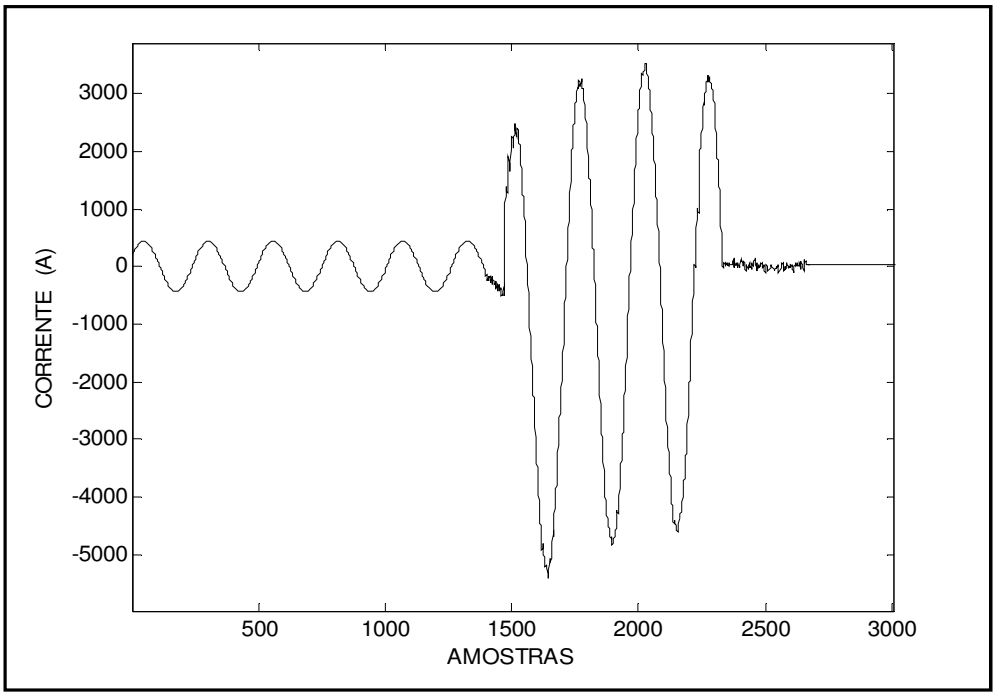

Figura 3.2 – Gráfico de corrente obtido para um sinal registrado pela oscilografia (256 amostras/ciclo) para uma falta fase-terra.

3.2.1.2. Sinais Simulados

Os sinais de tensão e corrente simulados foram obtidos a partir de simulação de faltas em um sistema fictício de transmissão, no software ATP-Draw, conforme esquema mostrado na Figura 3.3. Estes sinais foram utilizados no algoritmo de localização de faltas de três terminais.

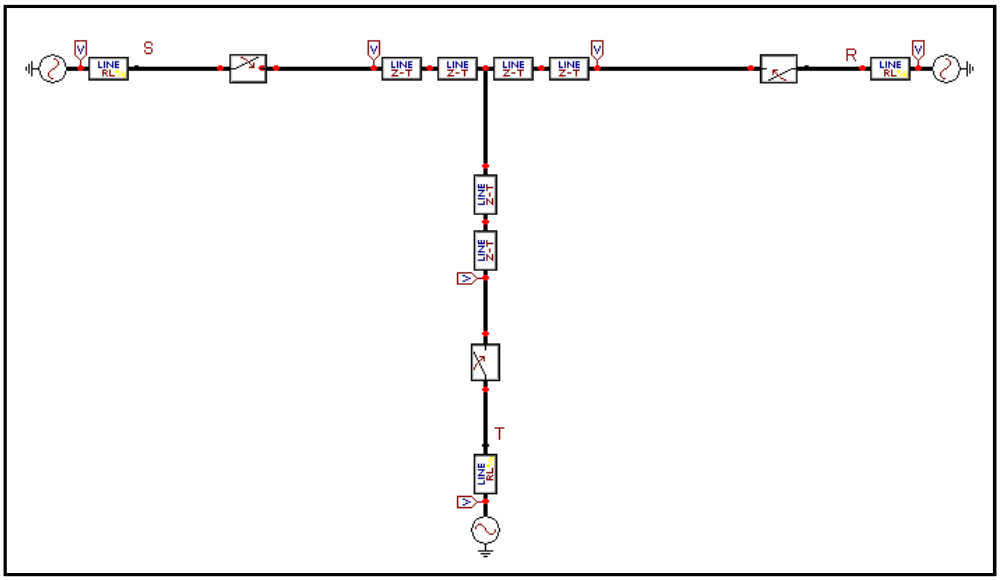

Figura 3.3 – Trecho de um sistema de transmissão de três terminais – ambiente ATP-Draw.

Para inserir os parâmetros do sistema de três terminais no ATP-Draw, simulou-se, inicialmente, um fluxo de carga com objetivo principal de encontrar as tensões e ângulos de fase pré-falta nas três barras. Para isso, na Figura 3.3, a barra (S) foi escolhida como referência e as demais não foram consideradas barras de geração e sim barras de carga: a barra R com 100 MVA de potência consumida, fator de potência 0,92 indutivo, e a barra T de 70 MVA, fator de potência 0,92 indutivo. As informações obtidas com este fluxo de carga (tensões e ângulos) foram inseridas no software ATP, esquema da Figura 3.3, para que este forneça, através de simulação, as tensões e correntes trifásicas dos três terminais da linha, que se constituem nos dados de entrada necessários para o algoritmo de localização utilizado. Considerou-se ainda na simulação uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo, a qual é compatível com as taxas de equipamentos registradores reais.

Na simulação das faltas permanentes, pressupõe-se a existência de equipamentos registradores em cada um dos terminais do sistema analisado. Dessa maneira, registra-se a

mesma falta em diferentes pontos da rede. A Figura 3.4 mostra o gráfico gerado por simulação, para as correntes nas três fases de uma das barras de observação. O gráfico mostra sinais com uma falta fase A-terra.

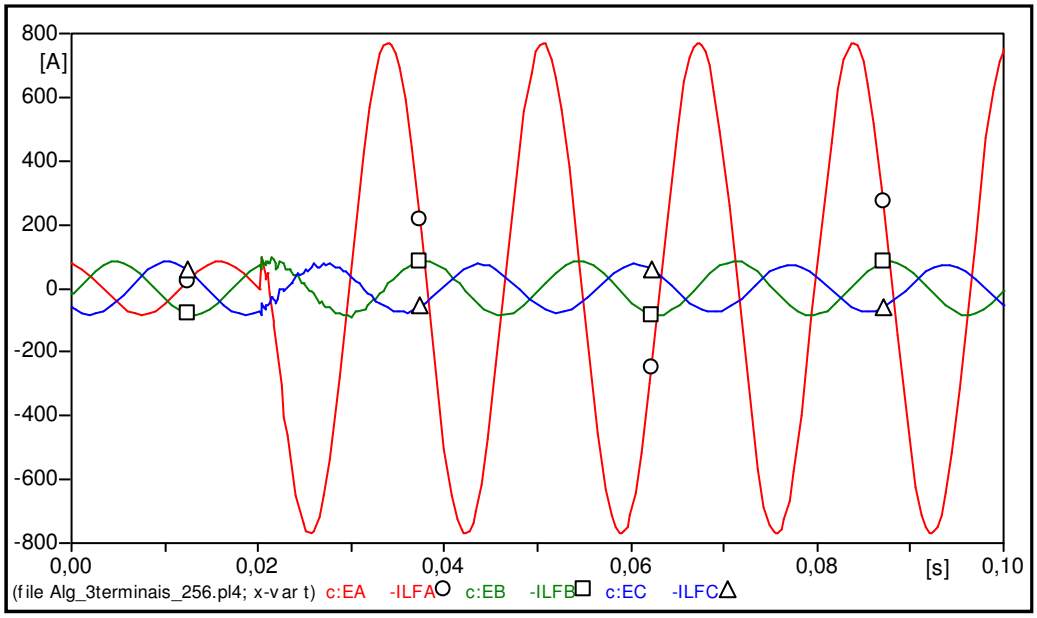

Figura 3.4 – Gráfico de correntes trifásicas obtidas com o ATP para uma falta fase A-terra.

3.3. O Algoritmo de Identificação do Instante de Início da Falta

O algoritmo de localização de faltas na linha adotado neste trabalho baseia-se no equacionamento de Girgis *et al*. (1992), que propuseram em seu algoritmo de localização uma abordagem para dados sincronizados e outra para dados não sincronizados. Esta última é constituída por um processo iterativo que objetiva encontrar tanto a distância de falta quanto o ângulo de sincronização entre a barra de referência e as demais barras do sistema. Um processo iterativo precisa de uma estimativa inicial para obtenção das incógnitas. Sendo esta inadequada, corre-se o risco do algoritmo de localização de faltas não convergir.

Dessa forma, elaborou-se um algoritmo de identificação do instante de início da falta, que também pode ser denominado de algoritmo de sincronização de dados ou algoritmo de localização da falta no tempo, que não utiliza processos iterativos para obtenção do local de ocorrência da falta. Os dados sincronizados são inseridos no

algoritmo de localização de faltas proposto por Girgis *et al*. (1992) para dados sincronizados.

O algoritmo de identificação do instante de início da falta está inserido na etapa de processamento do sinal. Nesta etapa são aplicados aos sinais trifásicos de corrente a Transformada Wavelet, ferramenta matemática que extrai informações importantes do sinal faltoso para identificar os instantes de início da falta em todos os terminais de uma linha de transmissão. Os procedimentos podem ser resumidos nas etapas descritas a seguir.

3.3.1. Etapa 1: Decomposição dos sinais em níveis pela Transforma Wavelet

Esta etapa constitui-se na decomposição do sinal faltoso em diferentes níveis de resolução. Isso é conseguido mediante a determinação dos coeficientes wavelet do sinal.

A partir dos sinais de corrente trifásicos obtidos do ATP ou de registradores oscilográficos, inicia-se o processo de detecção dos instantes de incidência da falta em cada terminal do sistema em análise. A idéia de utilizar apenas os sinais de corrente trifásicos nesta fase de processamento do sinal surgiu pelo fato destes apresentarem uma variação mais perceptível quando da ocorrência de uma falta no sistema, o que aumenta o desempenho da Transformada Wavelet na determinação do instante de início da falta.

A Transformada Wavelet e a análise multiresolução foram utilizadas para decompor os sinais de corrente em diferentes níveis de resolução wavelet e assim obter coeficientes de aproximação e detalhe dos sinais. Apenas os coeficientes de detalhe foram utilizados no algoritmo de sincronização de dados, pois estes contêm informações de alta freqüência, característica presente nos transitórios que ocorrem no momento de incidência de um curto-circuito.

Os detalhes do primeiro nível de decomposição são os que contêm as mais altas freqüências, o que o torna mais adequado para detecção de quaisquer variações rápidas no sinal. Esse nível, no entanto, nem sempre pode ser utilizado para detectar distúrbios presentes no sinal. Isso ocorre devido aos altos índices de ruído que podem estar presentes nestas faixas de freqüência e que devem ser levados em consideração quando sinais obtidos de medidas reais estão sendo analisados (MACHADO, 2006). Por esse motivo, adotou-se neste trabalho uma decomposição dos sinais de corrente trifásicos de cada

terminal em quatro níveis, que foram escolhidos pelo fato das mudanças no padrão do sinal serem mais bem visualizadas nos altos níveis de resolução, pois são os que contêm os maiores níveis de freqüência (PARAMESWARIAH *et al.*, 2002).

Caso um dos níveis não indique o instante de incidência da falta, existem outros três que podem indicar a localização da falta no tempo. Em todos os testes feitos foi possível detectar os instantes de início da falta usando os detalhes desses quatro níveis. A Figura 3.5 ilustra esse processo de decomposição de um sinal de corrente faltoso em quatro níveis de detalhe. A decomposição dos sinais utiliza a wavelet db4, da família Daubechies.

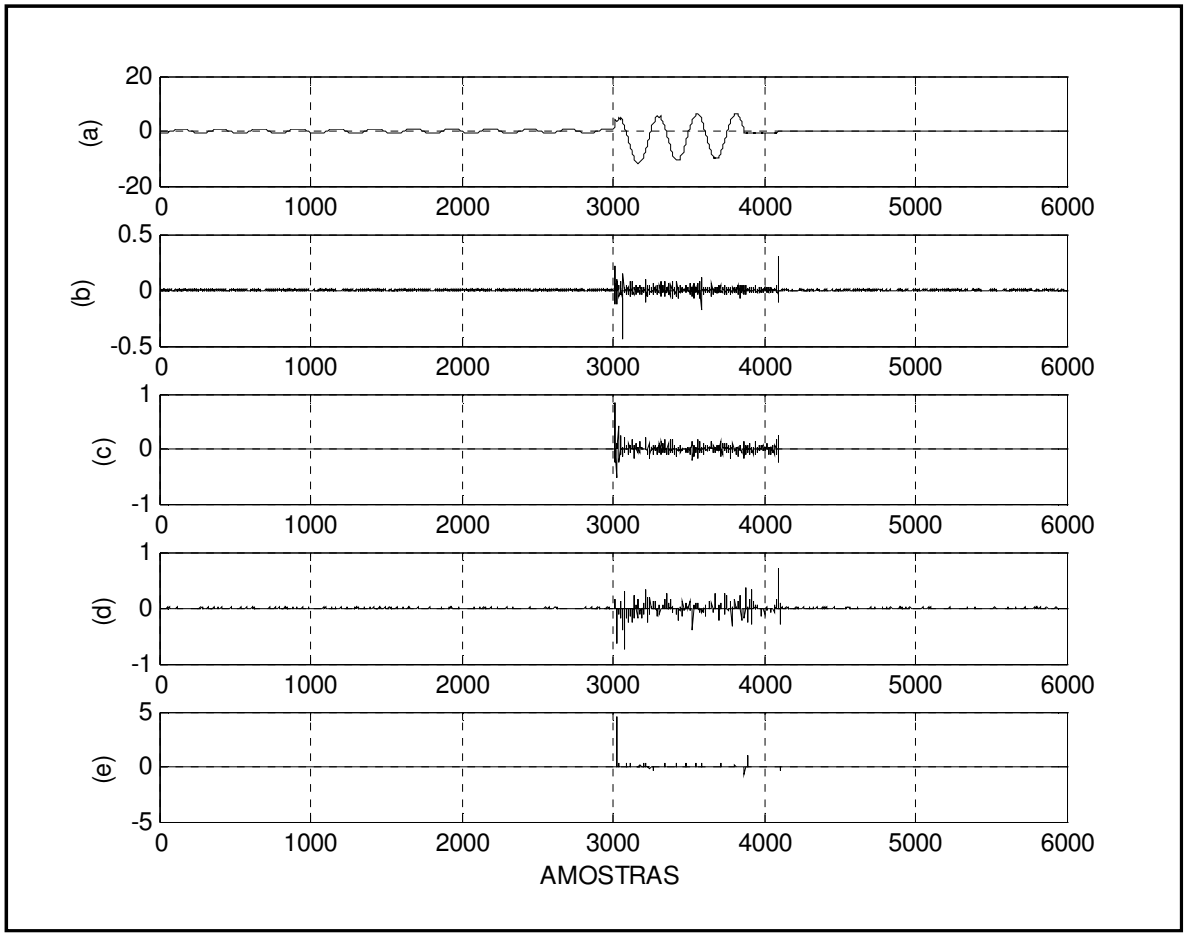

Figura 3.5 – Decomposição de um sinal em 4 níveis. Em (a) Sinal original. De (b) a (e) detalhes do nível 1 ao 4.

Vale ressaltar que a escolha da família Daubechies levou em consideração o grande número de trabalhos que mostram a eficiência das wavelets dessa família na área de sistemas de energia elétrica. A escolha da wavelet db4 foi baseada no desempenho do algoritmo de identificação do instante de início da falta a partir de testes realizados com

wavelets de várias ordens, da db2 a db16, verificando-se que a db4 apresentou o melhor desempenho.

Utilizaram-se os coeficientes de detalhe dos quatro primeiros níveis de decomposição. A seção seguinte aborda o tratamento do ruído nesses coeficientes.

3.3.2. Etapa 2: Redução de ruído nos coeficientes wavelet

Segundo MACHADO (2006), o desempenho da Transformada Wavelet é substancialmente melhorado se um procedimento para redução do nível de ruído for aplicado aos coeficientes do nível de decomposição a ser usado para detecção do instante de início da falta. Portanto, após a obtenção dos quatro primeiros níveis de detalhe dos sinais de corrente trifásicos medidos em todos os terminais da linha, aplica-se o procedimento descrito na equação (3.1) para reduzir o ruído nos coeficientes dos níveis de decomposição, utilizados para detecção da falta. Aplica-se a cada nível de decomposição o seguinte algoritmo apresentado em MISITI *et al*. (2000) *apud* MACHADO (2004):

$$d'_s(n) = \begin{cases} d_s(n) - \eta_s & se\ |d_s(n)| \geq \eta_s\ e\ d_s(n) > 0 \\ d_s(n) + \eta_s & se\ |d_s(n)| \geq \eta_s\ e\ d_s(n) < 0 \\ 0 & se\ \ |d_s(n)| < \eta_s \end{cases} \tag{3.1}$$

Na equação (3.1), tem-se que:

n = 1, 2, ..., N é o número de coeficientes do nível de decomposição s, $d_s(n)$, sendo N o número de amostras.

$d'_s(n)$ é o novo valor sem ruído de $d_s(n)$.

η_s é um limiar baseado no máximo valor absoluto dos coeficientes do nível de decomposição s.

O valor de η_s utilizado, determinado empiricamente, foi de 5% do máximo valor absoluto dos coeficientes de cada nível de decomposição considerado.

3.3.3. Etapa 3: Detecção do Início da Falta

A terceira etapa do algoritmo de sincronização corresponde ao método utilizado para indicação do ponto de início da falta. A partir dos coeficientes sem ruído dos quatro primeiros níveis de detalhe dos sinais faltosos, encontra-se o ponto de início da falta através do algoritmo apresentado em GAOUDA (2002).

$$m(n) = \begin{cases} 0 & [d'_s(n)]^2 < \sigma \\ 1 & [d'_s(n)]^2 \geq \sigma \end{cases} \tag{3.2}$$

Na equação (3.2), σ é o desvio padrão de $[d'_s(n)]^2$.

Sempre que o valor do coeficiente sem ruído elevado ao quadrado for maior ou igual ao desvio padrão calculado, a equação (3.2) identifica este ponto como "1", ou seja, determina o coeficiente situado numa região de falta. É dessa forma que o algoritmo proposto em (3.2) encontra o ponto de início da falta em cada nível de decomposição. O ponto de início é uma informação importante, pois é através dele que se poderá fazer a sincronização dos sinais em cada terminal envolvido no evento de falta.

O algoritmo em (3.2) foi originalmente proposto para encontrar os pontos de início da falta presente nos sinais analisados, no entanto, o ponto de término também pode ser encontrado pelo mesmo procedimento. Neste trabalho apenas o ponto inicial, p_i, é considerado como referência para fazer a sincronização dos dados.

O procedimento proposto resume-se a:

1. Calcular $[d'_s(n)]^2$;
2. Calcular o desvio padrão σ de $[d'_s(n)]^2$;
3. Fazer n=1;
4. Fazer o teste do coeficiente $[d'_s(n)]^2$ em relação a σ:
   Se $[d'_s(n)]^2 < \sigma$, então n=n+1 e retorna ao passo 4;
   Se $[d'_s(n)]^2 \geq \sigma$, p_i=n;
5. Fim.

Cada nível de decomposição indica um instante em que se iniciou a falta. Logo, para cada sinal de corrente trifásico é apresentado um resultado que indica quatro instantes de início da falta. Por exemplo, para cada terminal de uma linha tem-se três sinais de corrente das fases a, b e c. Cada uma dessas correntes origina quatro instantes de início de falta, o que corresponde a doze instantes por terminal. Comparam-se esses instantes e aquele identificado no menor instante de tempo é escolhido para sincronização de todos os sinais de corrente e tensão daquele terminal. Escolheu-se o menor instante de tempo pelo fato deste identificar o início do distúrbio mais rapidamente. A Figura 3.6 mostra um sinal de falta onde está indicado o ponto de início encontrado com o procedimento proposto, estando localizado na amostra 3008.

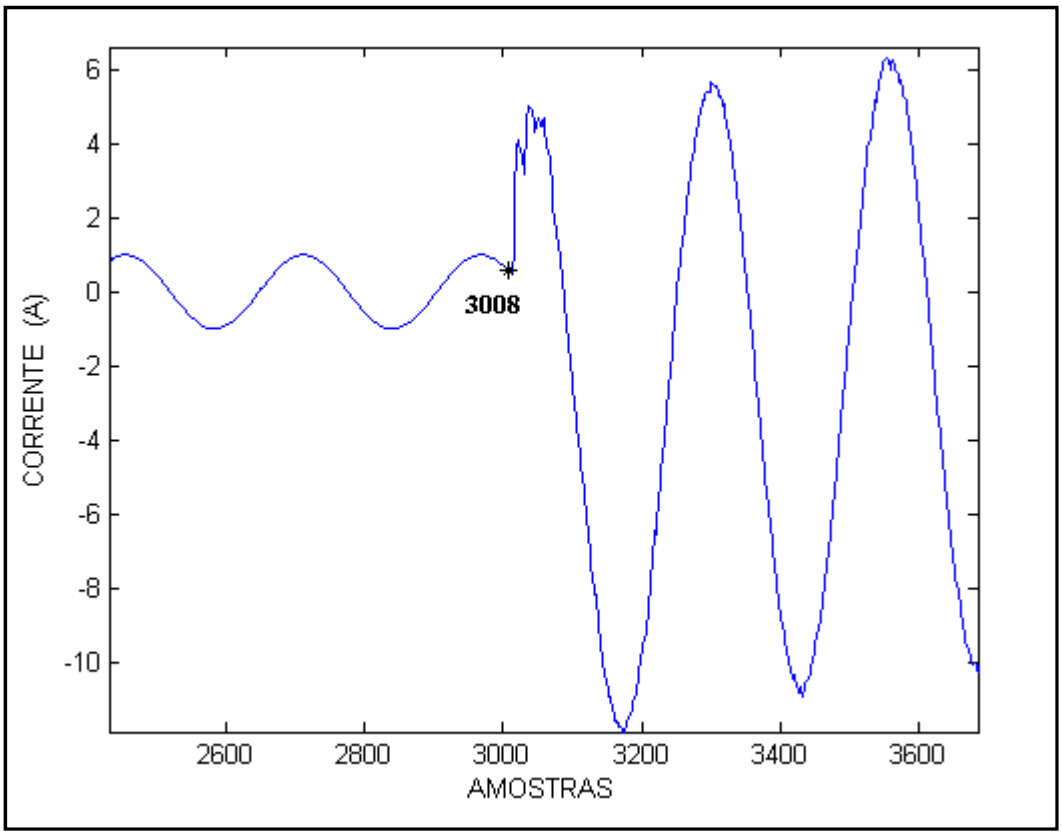

Figura 3.6 – Sinal com indicação do instante de início da falta.

3.4. Considerações sobre o método de sincronização de dados

O procedimento desenvolvido para determinação dos instantes de início da falta é relevante, principalmente, quando se utilizam sinais reais, que não estão sincronizados,

pois, a partir do instante em que se iniciou o registro da falta em todos os terminais, é possível sincronizá-los.

O algoritmo de sincronização de dados foi aplicado nos sinais de registros oscilográficos, que não estavam sincronizados, e também nos dados simulados do ATP. Apesar dos sinais de tensão e corrente oriundos do ATP estarem sincronizados, esta etapa também foi feita com o objetivo de validar a proposta da localização no tempo. A metodologia proposta foi desenvolvida e programada para utilização no software MATLAB®.

3.5. Obtenção dos fasores fundamentais de tensão e corrente sincronizados

A abordagem de localização de faltas em linhas de transmissão proposta neste trabalho utiliza fasores de tensão e corrente fundamentais sincronizados. Os dados de tensão e corrente são sincronizados pela etapa descrita na Seção 3.3, a de localização da falta no tempo, ou seja, de identificação do início de falta. Nesta seção, aborda-se o processo de extração dos fasores fundamentais desses sinais.

Os sinais de pós-falta de tensão e de corrente apresentam, além da componente fundamental, componentes CC de decaimento exponencial e componentes de alta freqüência. Dessa forma, torna-se necessária a extração precisa dos fasores fundamentais de tensão e de corrente através das técnicas especiais de filtragem digital, visando a obter um alto grau de confiabilidade na localização da falta.

A extração das componentes fundamentais nesta dissertação foi feita por meio da Transformada Discreta de Fourier para um ciclo completo de dados. A equação geral do método é dada por SMITH (1999) *apud* MONTEIRO (2006):

$$X(k) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}. \tag{3.3}$$

Na equação (3.3), tem-se que:

$x(n)$: ondas de tensão ou corrente amostradas, com n variando sobre um período de 0 a $N-1$.

N: número de amostras por ciclo.

$X(k)$: fasores calculados em frequências k múltiplas de *fm*/N, sendo *fm* a freqüência de amostragem e *k* definida sobre um período de 0 a $N-1$.

No algoritmo de extração da componente fundamental, admitiu-se que $x(n)$, na equação (3.3), representa um único ciclo de dados de tensão ou corrente. Esse ciclo de dados, usado como entrada no algoritmo da Transformada Discreta de Fourier, é escolhido com base no método de localização da falta no tempo, o qual indica o instante de início da falta. Após a detecção, escolhe-se o terceiro ciclo depois deste instante como ciclo de dados de entrada $x(n)$ da Transformada Discreta de Fourier. Esta metodologia foi adotada com o objetivo de evitar os fortes transitórios eletromagnéticos contidos nas formas de onda no instante de incidência da falta, pois observou-se, nos exemplos tratados, que componentes transitórios podem estar presentes até o segundo ciclo.

A Transformada Discreta de Fourier além de fazer a extração das componentes fundamentais ainda atua como um filtro, visto que seleciona apenas a componente de 60 Hz e elimina as outras componentes de freqüência que podem estar contidas no sinal faltoso. Dessa forma, obtém-se a medição dos fasores fundamentais de tensão e corrente requeridos pelo algoritmo.

3.6. Conclusão

Este capítulo apresentou um algoritmo para a identificação do instante de início da falta, o qual é utilizado neste trabalho para sincronizar os sinais de tensão e corrente dos múltiplos terminais de uma linha de transmissão. Relatam-se as etapas desenvolvidas nesse algoritmo, que se baseiam na utilização da Transformada Wavelet Discreta para detecção dos instantes de incidência da falta nos terminais envolvidos. Apresenta-se também uma breve revisão sobre a Transformada Discreta da Fourier, método utilizado para extrair os fasores fundamentais dos sinais de tensão e corrente sincronizados, os quais são as entrada do algoritmo de localização da falta na linha proposto.

CAPÍTULO 4

Algoritmo para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão

4.1. Introdução

O algoritmo de localização utilizado neste trabalho foca a localização de faltas em linhas que possuem dois e três terminais. Baseia-se em uma técnica que utiliza fasores fundamentais sincronizados de tensão e corrente para determinar precisamente a distância de faltas que podem ocorrer em uma linha de transmissão de energia. Utiliza ainda a matriz de impedância série da linha em seu equacionamento e despreza sua capacitância shunt (GIRGIS *et al*., 1992).

Os princípios desta técnica de localização estão concentrados na utilização de fasores de tensão e corrente trifásicos medidos em todos os terminais da linha para realizar a localização da falta. A seguir, apresenta-se o equacionamento deste algoritmo para linhas de transmissão que possuem dois e três terminais.

4.2. Localização de Faltas em linhas com dois terminais

A localização de faltas em linhas de transmissão de dois terminais possui um equacionamento que depende de sinais trifásicos nas duas barras de medição. A representação do sistema com dois terminais está ilustrada na Figura 4.1.

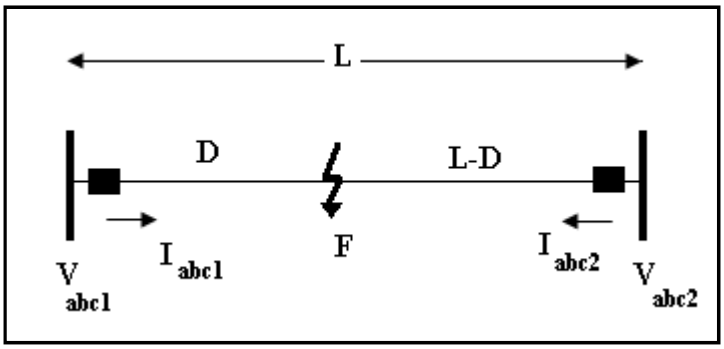

Figura 4.1 – Representação unifilar da linha de transmissão faltosa utilizada no equacionamento do algoritmo de dois terminais.

Considerando que os fasores trifásicos de tensão e corrente nos barramentos 1 e 2 estejam sincronizados, os vetores trifásicos de tensão nessas barras podem ser representados em função dos vetores de corrente trifásicos da forma descrita nas equações (4.1) e (4.2).

$$VF_{abc} = V_{abc1} - D\boldsymbol{Z_{abc}}I_{abc1} \tag{4.1}$$

$$VF_{abc} = V_{abc2} - (L - D)\boldsymbol{Z_{abc}}I_{abc2} \tag{4.2}$$

Igualando as equações (4.1) e (4.2), obtém-se:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + L\boldsymbol{Z_{abc}}I_{abc2} = D\boldsymbol{Z_{abc}}(I_{abc1} + I_{abc2}). \tag{4.3}$$

Nas equações (4.1) a (4.3), tem-se que:

- V_{abc1} e V_{abc2} são os fasores de tensões trifásicos nos terminais 1e 2, respectivamente.
- $\boldsymbol{Z_{abc}}$ representa a matriz de impedância série, por unidade de comprimento, da linha de comprimento L.
- I_{abc1} e I_{abc2} são os fasores de correntes trifásicos na linha de comprimento L.

A equação (4.3) pode ser reescrita na seguinte forma trifásica:

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} D \;\; ou \;\; Y = MD \tag{4.4}$$

Na equação (4.4), tem-se que:

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + \; L \sum_i \left(Z_{ji} I_{i2} \right) \tag{4.5}$$

$$M_j = \sum_i Z_{ji} (I_{i1} + I_{i2}); \qquad i = a, b, c; \; j = a, b, c \tag{4.6}$$

A equação (4.4) representa três equações complexas ou seis equações reais e uma incógnita, D (GIRGIS *et al.*, 1992).

A solução para D na expressão (4.4) é obtida pelo método dos mínimos quadrados, e é dada por

$$D = (M^+ M)^{-1} M^+ Y. \tag{4.7}$$

Na equação (4.7), M^+ é a representação transposta conjugada de M.

4.3. Localização de Faltas em linhas com três terminais

A localização de faltas em linhas de transmissão de três terminais possui um equacionamento que depende de sinais trifásicos nas três barras de medição. A representação do sistema com três terminais está ilustrada na Figura 4.2. Nessa figura, L_1, L_2 e L_3 são os trechos em que podem ocorrer faltas. A falta que acontece em cada um desses trechos apresenta um equacionamento específico. No equacionamento descrito a seguir, assumiu-se que as variáveis presentes na Figura 4.2, I_{abc1}, I_{abc2}, I_{abc3}, V_{abc1}, V_{abc2} e V_{abc3} são, respectivamente, I_1, I_2, I_3, V_1, V_2, V_3.

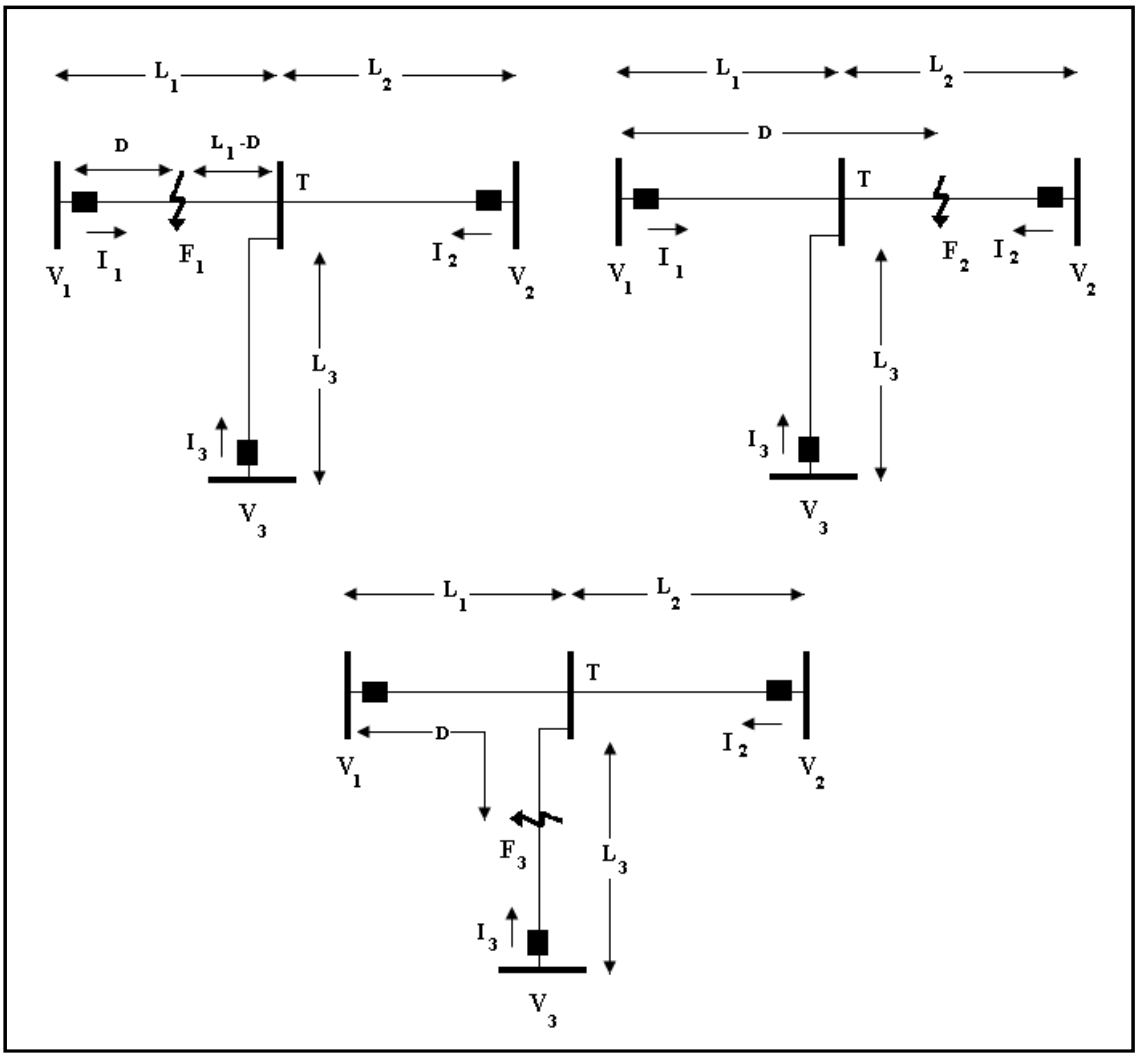

Figura 4.2 - Representação unifilar da linha de transmissão faltosa utilizada no equacionamento do algoritmo de três terminais.

4.3.1. Falta em L_1

Considerando que os fasores trifásicos de tensão e corrente nos três barramentos estejam sincronizados, podem-se escrever as equações abaixo, admitindo uma falta no trecho L_1.

$$VF_1 = V_1 - D\boldsymbol{Z_1}I_1 \tag{4.8}$$

$$VF_1 = V_2 - L_2\boldsymbol{Z_2}I_2 - (L_1 - D)\boldsymbol{Z_1}(I_2 + I_3) \tag{4.9}$$

$$VF_1 = V_3 - L_3\boldsymbol{Z_3}I_3 - (L_1 - D)\boldsymbol{Z_1}(I_2 + I_3) \tag{4.10}$$

Nas equações (4.8) a (4.10), V_1, V_2 e V_3 são os fasores de tensões trifásicos nos terminais 1, 2 e 3, respectivamente; $\mathbf{Z_1}$, $\mathbf{Z_2}$, $\mathbf{Z_3}$ representam as matrizes de impedância série, por unidade de comprimento, das seções de linha L_1, L_2 e L_3; I_1, I_2 e I_3 são os fasores de correntes trifásicos nos trechos L_1, L_2 e L_3, respectivamente.

Igualando as equações (4.8) e (4.9) tem-se que:

$$V_1 - V_2 + (L_2\mathbf{Z_2} + L_1\mathbf{Z_1})I_2 + \mathbf{Z_1}L_1I_3 = D\mathbf{Z_1}(I_1 + I_2 + I_3) \tag{4.11}$$

Igualando as equações (4.8) e (4.10) tem-se que:

$$V_1 - V_3 + (L_3\mathbf{Z_3} + L_1\mathbf{Z_1})I_3 + \mathbf{Z_1}L_1I_2 = D\mathbf{Z_1}(I_1 + I_2 + I_3) \tag{4.12}$$

A equação (4.11) pode ser representada da seguinte forma trifásica:

$$\begin{bmatrix} Y1_a \\ Y1_b \\ Y1_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} D \tag{4.13}$$

Na equação (4.13), tem-se:

$$Y1_j = V_{j1} - V_{j2} + \sum_k \left(L_2Z_{2jk} + L_1Z_{1jk}\right)I_{k2} + L_1\sum_k(Z_{1jk}I_{k3}) \tag{4.14}$$

$$M_j = \sum_k(I_{k1} + I_{k2} + I_{k3})\,Z_1\ ; \qquad k = a, b, c;\ j = a, b, c \tag{4.15}$$

Similarmente, a equação (4.12) pode ser apresentada na seguinte forma trifásica:

$$\begin{bmatrix} Y2_a \\ Y2_b \\ Y2_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} D' \tag{4.16}$$

Na equação (4.16), tem-se:

$$Y2_j = V_{j1} - V_{j3} + \sum_k \left(L_3Z_{3jk} + L_1Z_{1jk}\right)I_{k3} + L_1\sum_k(Z_{1jk}I_{k2}) \tag{4.17}$$

$$M_j = \sum_k(I_{k1} + I_{k2} + I_{k3})\,Z_1\ ; \qquad k = a, b, c;\ j = a, b, c \tag{4.18}$$

As equações (4.13) e (4.16) representam, cada uma, três equações complexas e uma incógnita, ou seis equações reais e uma incógnita. A solução para D, obtida com o uso do método dos mínimos quadrados, a partir da equação (4.13) é dada por:

$$D = (M^{+}M)^{-1}M^{+}Y1. \tag{4.19}$$

Outra solução para D pode ser obtida a partir da equação (4.16), dada por:

$$D' = (M^{+}M)^{-1}M^{+}Y2. \tag{4.20}$$

Nas equações (4.19) e (4.20), M^{+} é a representação transposta conjugada de M.

Com esta situação de falta no trecho L_1, conclui-se que, para uma falta ser localizada pelo algoritmo neste trecho, é preciso que:

$$D < L_1 \text{ e } D' < L_1.$$

4.3.2. Falta em L_2

Para uma falta no trecho L_2, obtêm-se as seguintes equações:

$$VF_2 = V_1 - \boldsymbol{Z_1} L_1 I_1 - \boldsymbol{Z_2}(D - L_1)(I_1 + I_3) \tag{4.21}$$

$$VF_2 = V_2 - \boldsymbol{Z_2}(L_1 + L_2 - D) I_2 \tag{4.22}$$

$$VF_2 = V_3 - \boldsymbol{Z_3} L_3 I_3 - \boldsymbol{Z_2}(D - L_1)(I_1 + I_3) \tag{4.23}$$

Igualando as equações (4.21) e (4.22), assumindo que as impedâncias da linha por unidade de comprimento são iguais para todos os trechos, tem-se que:

$$V_1 - V_2 + (\boldsymbol{Z} L_2 + \boldsymbol{Z} L_1) I_2 + \boldsymbol{Z} L_1 I_3 = D\boldsymbol{Z}(I_1 + I_2 + I_3) \tag{4.24}$$

Igualando as equações (4.21) e (4.23), assumindo que as impedâncias da linha por unidade de comprimento são iguais para todos os trechos, tem-se que:

$$V_1 - V_3 + \boldsymbol{Z} L_3 I_3 = \boldsymbol{Z} L_1 I_1 \tag{4.25}$$

Pode-se notar que há uma semelhança entre as equações obtidas para uma falta em L_2 e uma falta em L_1. Para localizar uma falta em L_2, tem-se que a equação (4.11) se mantém, porém a equação (4.12) se modifica, sendo agora igual a (4.25). Se for considerado na equação (4.12) que D = L_1, obtém-se a equação (4.25). Logo, para localizar uma falta em L_2, podem-se utilizar as mesmas equações que resultaram de uma falta em L_1, de acordo com as seguintes condições:

Se D > L_1 e D' = L_1, tem-se que a falta ocorreu no trecho L_2.

4.3.3. Falta em L_3

Para uma falta em L_3, obtêm-se as seguintes equações:

$$VF_3 = V_1 - \boldsymbol{Z_1} L_1 I_1 - \boldsymbol{Z_3}(D - L_1)(I_1 + I_2) \tag{4.26}$$

$$VF_3 = V_2 - \boldsymbol{Z_2} L_2 I_2 - \boldsymbol{Z_3}(D - L_1)(I_1 + I_2) \tag{4.27}$$

$$VF_3 = V_3 - \boldsymbol{Z_3}(L_1 + L_3 - D) I_3 \tag{4.28}$$

Igualando as equações (4.26) e (4.27), assumindo que as impedâncias da linha por unidade de comprimento são iguais para todos os trechos, tem-se que:

$$V_1 - V_2 + \boldsymbol{Z} L_2 I_2 = \boldsymbol{Z} L_1 I_1 \tag{4.29}$$

Igualando as equações (4.27) e (4.28), assumindo que as impedâncias da linha por unidade de comprimento são iguais para todos os trechos, tem-se que:

$$V_1 - V_3 + (\boldsymbol{Z} L_3 + \boldsymbol{Z} L_1) I_3 + \boldsymbol{Z} L_1 I_2 = D\boldsymbol{Z}(I_1 + I_2 + I_3) \tag{4.30}$$

Similarmente ao que ocorreu para uma falta em L_2, pode-se notar que há uma semelhança entre as equações obtidas para uma falta em L_3 e uma falta em L_1. Para localizar uma falta em L_3, tem-se que a equação (4.12) se mantém, porém a equação (4.11) se modifica, sendo agora igual a (4.29). Caso se considere na equação (4.11), que D = L_1, obtém-se a equação (4.29). Logo, para localizar uma falta em L_3, podem-se utilizar as

mesmas equações que resultaram de uma falta em L_1, de acordo com as seguintes condições:

Se $D = L_1$ e $D' > L_1$, tem-se que a falta ocorreu no trecho L_3.

4.4. Considerações sobre o método de localização

O algoritmo apresentado constitui-se em uma ferramenta simples para desempenhar a função de localização de faltas em linhas de transmissão. O método se torna mais interessante ainda pelo fato de usar apenas duas equações (4.11) e (4.12) para resolver o problema de localização de faltas nas seções L_1, L_2 ou L_3 das linhas com três terminais. É independente do tipo e resistência de falta, bem como não precisa de nenhuma informação a respeito da impedância da fonte. A distância de falta é dada sempre com relação a um terminal de referência, que neste trabalho é o terminal que contém a geração 1.

4.5. Implementação do algoritmo

Este algoritmo de localização foi implementado no software MATLAB®. Os dados de entrada - sinais de tensão e corrente faltosos, foram obtidos de simulações no ATP e também de dados reais obtidos de registradores oscilográficos da CHESF. Vale ressaltar que estes dados de entrada passaram pelo processamento descrito no capítulo 3.

4.6. Conclusão

Este capítulo apresentou o equacionamento do algoritmo de localização da falta na linha utilizado neste trabalho. O método usa fasores de tensão e corrente sincronizados, representa a linha através de sua impedância série e aplica-se a linhas de transmissão de dois e três terminais. A técnica de localização proposta se torna interessante pelo fato de utilizar apenas duas equações para resolver o problema de localização em linhas múltiplos terminais.

CAPÍTULO 5

Aplicações e Resultados para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Dois e Três Terminais

5.1. Considerações iniciais

Os resultados que serão apresentados neste capítulo referem-se aos testes que foram realizados com o algoritmo utilizado para localização de faltas em linhas de transmissão com dados provenientes de dois e de três terminais. Nas linhas de dois terminais, testou-se o algoritmo de localização utilizando dados reais oriundos de registros oscilográficos da CHESF. Nas linhas com três terminais, o algoritmo de localização foi testado usando dados simulados do ATP.

Todos os casos de faltas analisados neste trabalho, para linhas de dois e de três terminais, correspondem a faltas do tipo fase-terra. Os testes feitos apenas para este tipo de falta levaram em consideração as observações práticas que mostram que entre 70% e 80% das faltas nas linhas de transmissão ocorrem entre um só condutor e a terra (STEVENSON, 1986).

5.2. Considerações gerais

5.2.1. Erro de localização da falta

O erro de localização da falta é o parâmetro de maior relevância na avaliação do desempenho de um algoritmo de localização. É o parâmetro usado como medida de precisão do método utilizado, sendo definido pela equação (5.1).

$$\varepsilon(\%) = \left|\frac{d_{estimada} - d_{real}}{l}\right| \times 100 \tag{5.1}$$

Na equação (5.1), tem-se que:

$d_{estimada}$: distância da falta estimada pelo localizador de faltas.

d_{real} : distância real da falta.

l: comprimento do trecho da linha onde ocorreu a falta.

5.2.2. Matriz de impedância série da linha

O algoritmo de localização de faltas utilizado neste trabalho usa a matriz de impedância série em seu equacionamento para o cálculo da distância de falta. Essa matriz é determinada com base nos parâmetros da linha, conforme DOMMEL (1995).

$$\boldsymbol{Z_{abc}} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix}. \tag{5.2}$$

$$Z_M = \frac{Z_0 - Z_1}{3} \tag{5.3}$$

$$Z_P = Z_M + Z_1 \tag{5.4}$$

Os parâmetros de impedância, constantes das equações (5.2), (5.3) e (5.4), são:

Z_P : impedância própria da linha.

Z_M : impedância mútua da linha.

$\boldsymbol{Z_{abc}}$: matriz de impedância série da linha, admitindo-se transposição das linhas.

5.3. Localização de faltas em linhas com dois terminais

O algoritmo de localização de faltas foi aplicado em linhas de transmissão com dados provenientes de dois terminais. Utilizaram-se para testes dados obtidos de registros reais em linhas de transmissão pertencentes ao sistema CHESF. Esses dados não estão sincronizados e, por isso, passam pela etapa de processamento, que consiste na localização da falta no tempo com objetivo de obter o instante de incidência da falta nos dois terminais da linha e, assim, realizar a sua sincronização. Na etapa de processamento, ainda são extraídos os fasores fundamentais de tensão e corrente que serão usados no algoritmo de localização da falta na linha. Antes de descrever os resultados obtidos, apresentam-se os sistemas de dois terminais utilizados nos testes.

5.3.1. Sistemas Elétricos Analisados

Utilizaram-se duas linhas de transmissão (Figura 5.1 e Figura 5.2) do sistema CHESF para validação dos resultados do algoritmo de localização de faltas em dois terminais. São elas:

- Linha 04V3 CGD - NTD (Campina Grande – Natal II).
- Linha 05S4 LGZ – OLD (Luíz Gonzaga – Olindina).

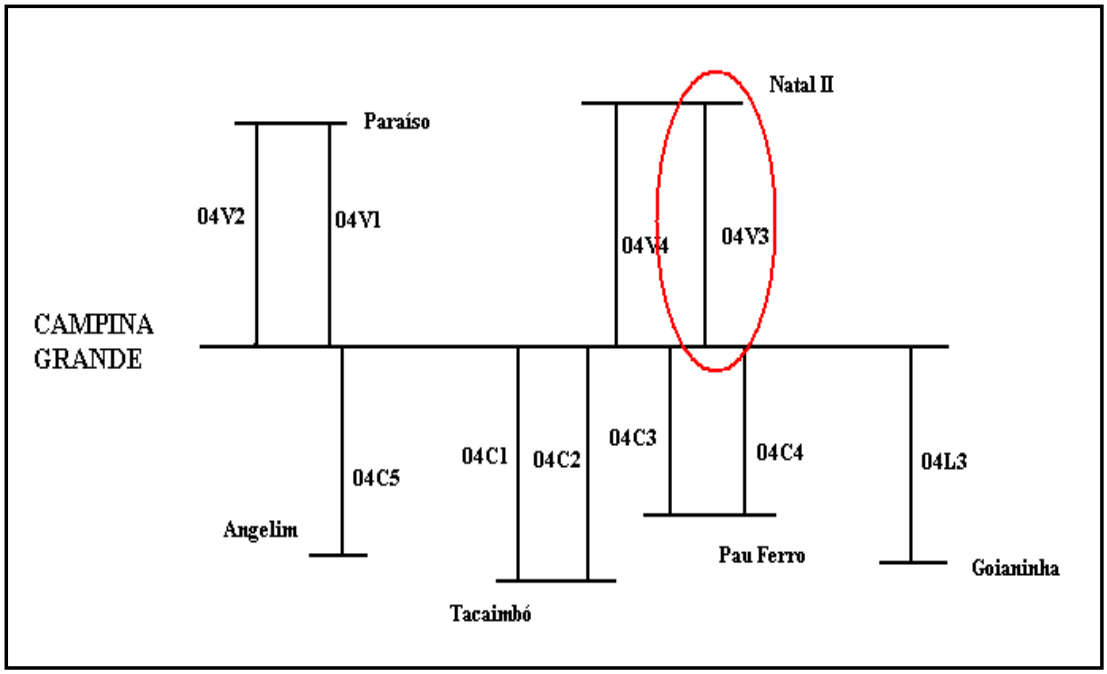

Figura 5.1 – Sistema CHESF - Linha CGD – NTD – 04V3.

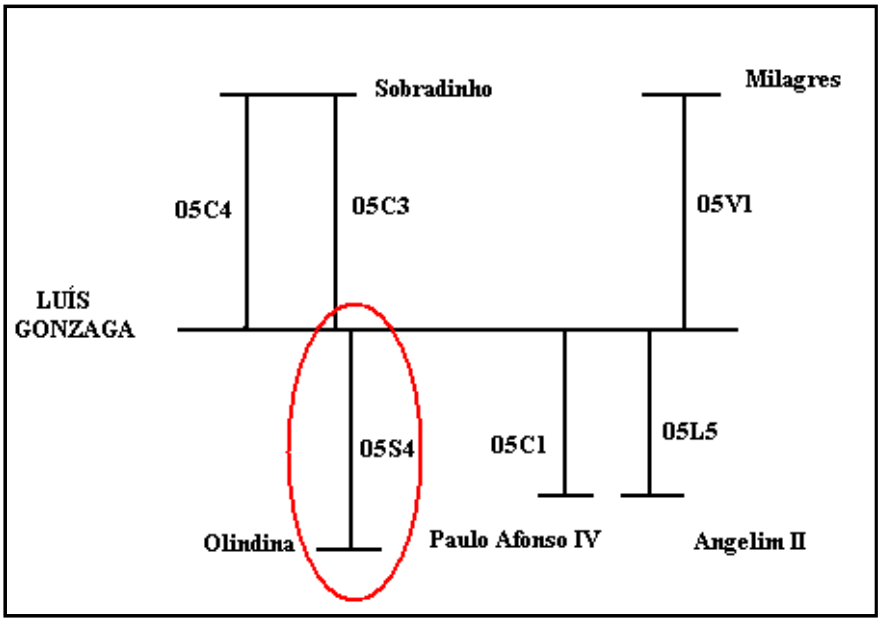

Figura 5.2 – Sistema CHESF - Linha LGZ – OLD – 05S4.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 podem-se observar os parâmetros série que representam, respectivamente, as linhas CGD-NTD e LGZ-OLD.

Tabela 5.1. Parâmetros de seqüência – Linha CGD-NTD.

SEQUÊNCIA POSITIVA			SEQUÊNCIA ZERO	
R(pu)	X(pu)		R(pu)	X(pu)
0,0171	0,1247		0,0816	0,4167

Tabela 5.2. Parâmetros de seqüência – Linha LGZ-OLD.

SEQUÊNCIA POSITIVA			SEQUÊNCIA ZERO	
R(pu)	X(pu)		R(pu)	X(pu)
0,0031	0,031		0,0241	0,08866

A linha CGD-NTD possui extensão de 188,16 km, operando em tensão nominal de 230 kV. A linha LGZ-OLD possui extensão de 248,6 km e tensão nominal de 500 kV.

5.3.2. Resultados

A qualidade dos resultados obtidos com o método de localização de faltas em linhas com dois terminais é mensurada através do erro de localização, que é dado conforme a equação (5.1). Os eventos de falta ocorreram nas linhas CGD-NTD e LGZ-OLD, da CHESF. As distâncias reais das faltas foram fornecidas pela empresa, bem como as distâncias que foram calculadas por um software que atualmente faz o processo de localização de faltas no sistema e que se baseia em dados provenientes de apenas um terminal da linha para identificar o local da falta.

As faltas que ocorreram nas duas linhas de transmissão são monofásicas, sendo na linha LGZ-OLD uma falta fase B-terra e na linha CGD-NTD uma falta fase C-terra, ilustradas nas Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente. Essas figuras mostram os sinais de corrente trifásicos registrados pela oscilografia em um dos terminais, bem como o ponto de início da falta encontrado pelo algoritmo de localização da falta no tempo. O ponto em destaque nas Figuras 5.3 e 5.4 representa a amostra em que a falta foi detectada, que é a mesma para todos os sinais de corrente trifásicos representados.

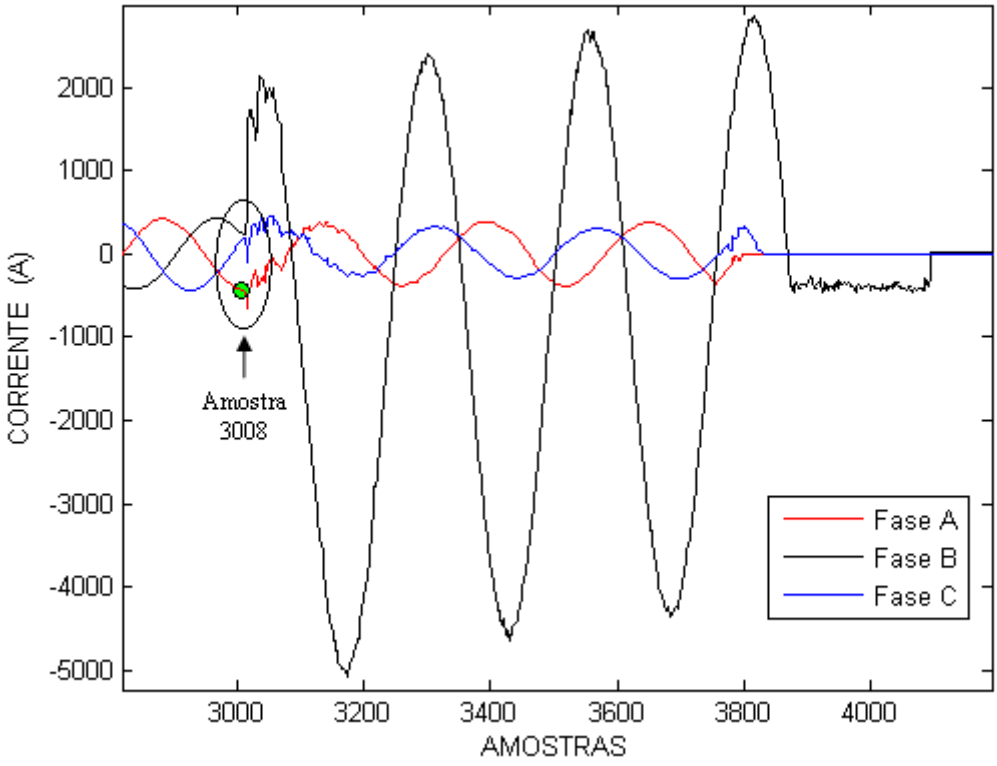

Figura 5.3 – Sinais de corrente trifásicos em um dos terminais da linha LGZ-OLD com indicação do ponto de incidência da falta fase B-terra.

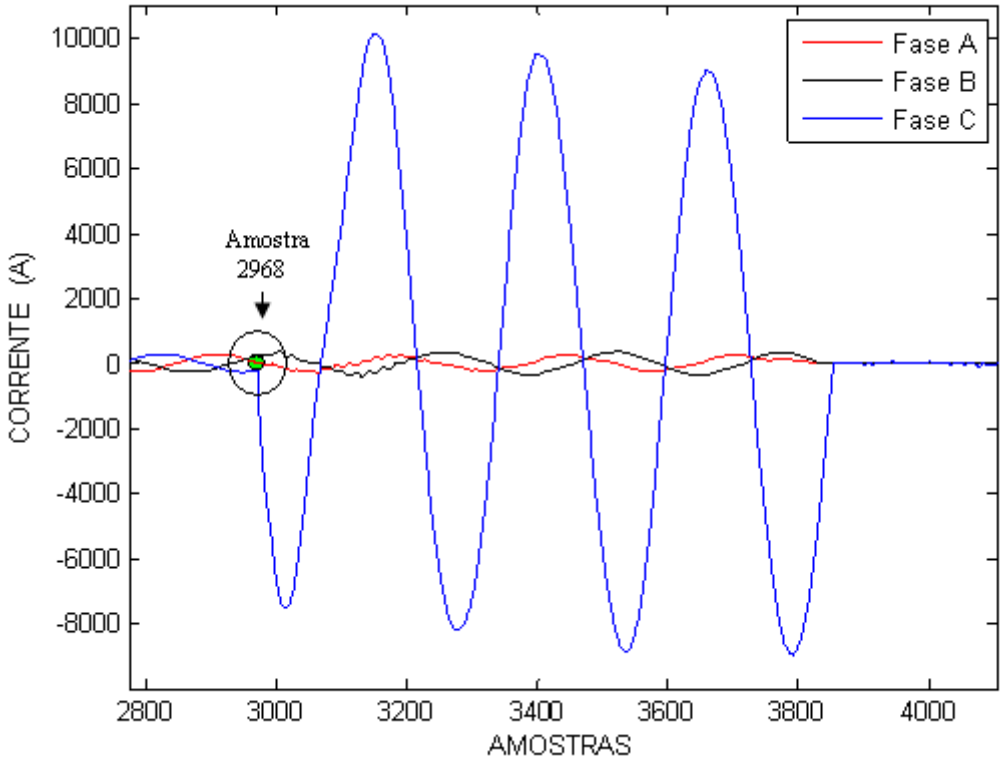

Figura 5.4 – Sinais de corrente trifásicos em um dos terminais da linha CGD-NTD com indicação do ponto de incidência da falta fase C-terra.

O algoritmo de localização do instante de incidência da falta mostrou-se preciso nos dois casos. A partir dos dados sincronizados, extraem-se os fasores fundamentais de tensão e corrente e aplica-se o método de localização da falta na linha. As tabelas abaixo mostram o erro percentual entre a distância real de falta e a distância calculada pelo método proposto para as duas linhas em análise.

Tabela 5.3. Resultados obtidos para localização de falta na linha LGZ-OLD.

Distância Real (km)	Distância estimada (km)	Erro de localização (%)
146,74	153,92	2,89

Tabela 5.4. Resultados obtidos para localização de falta na linha CGD-NTD.

Distância Real (km)	Distância estimada (km)	Erro de localização (%)
13,43	8,75	2,49

Os resultados da localização da falta para linhas com dois terminais utilizando dados reais mostraram-se satisfatórios, visto que algoritmos que utilizam dados de apenas um terminal da linha registram erros que chegam a 20,27% nas situações analisadas. Além disso, existem fatores, como a resistência de falta, ângulo de incidência, transposição de linhas, entre outros, que podem estar contribuindo para os erros apresentados.

Na próxima seção serão analisados os resultados do algoritmo de localização de faltas para linhas com três terminais. Como se utilizam dados simulados, testes serão feitos a fim de verificar o comportamento do algoritmo de localização em relação a fatores como a resistência de falta, distância de falta e ângulo de incidência.

5.4. Localização de faltas em linhas com três terminais

O algoritmo de localização de faltas proposto também foi aplicado em linhas de transmissão com dados provenientes de três terminais. Utilizaram-se para testes dados obtidos por simulações no software ATP-Draw. Estes dados estão sincronizados, no entanto, com o objetivo de validar o algoritmo de localização da falta no tempo proposto, executa-se a etapa de processamento também para os dados simulados. Antes de descrever os resultados obtidos, apresenta-se o sistema de três terminais utilizado nos testes.

5.4.1. Sistema Elétrico Analisado

O sistema de três terminais utilizado nas simulações é fictício e possui a configuração ilustrada na Figura 5.5.

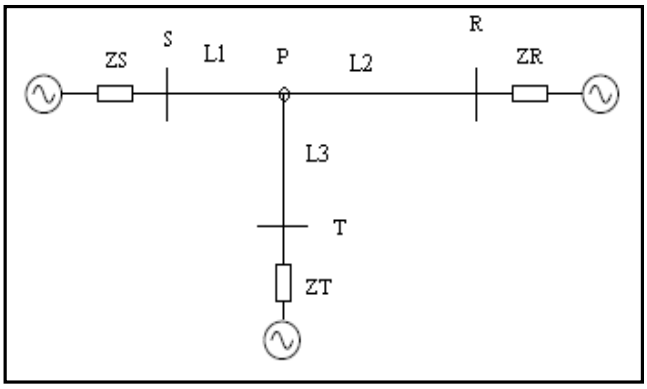

Figura 5.5 - Configuração unifilar da linha de transmissão analisada.

Adotaram-se nas simulações valores típicos de parâmetros de seqüência positiva e zero das linhas de transmissão da Eletrosul (DALCASTAGNÊ, 2007). As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam estes valores para o nível de tensão de 230 kV. Admitiu-se que os trechos L_1, L_2 e L_3 possuem as mesmas impedâncias.

Tabela 5.5. Parâmetros de seqüência positiva adotados nas simulações das linhas de três terminais.

SEQUÊNCIA POSITIVA			
Tensão (kV)	**R (Ω/km)**	**L (mH/km)**	**C (nF/km)**
230	0,09127	1,376	8,47

Tabela 5.6. Parâmetros de seqüência zero adotados nas simulações das linhas de três terminais.

SEQUÊNCIA ZERO			
Tensão (kV)	**R (Ω/km)**	**L (mH/km)**	**C (nF/km)**
230	0,44016	4,153	6,10

Os parâmetros de geração adotados (SILVA, 2003) estão representados na Tabela 5.7. Considerou-se, empiricamente, que a impedância da geração conectada à barra R é igual a impedância da geração conectada à barra T. A geração conectada à barra S é diferente das demais. O algoritmo de localização de faltas não depende dos parâmetros de geração em seu equacionamento, sendo estes valores adotados com o objetivo de simular um sistema com características próximas de sistemas reais.

Tabela 5.7. Parâmetros dos equivalentes de geração das barras S, R e T.

Geradores – Barras R e T				**Gerador – Barra S**	
	Seqüência positiva	Seqüência zero		Seqüência positiva	Seqüência zero
R (Ω/km)	1,698	0,358		1,787	0,405
L (mH/km)	51,4	11,2		54,1	12,3

O ponto P, de interseção dos trechos L_1, L_2 e L_3, está localizado a 40% do tamanho total do trecho S-R. A dimensão de cada trecho adotado na simulação do sistema de três terminais é apresentada na tabela 5.8.

Tabela 5.8. Dimensão dos trechos L_1, L_2 e L_3 do sistema de três terminais simulado no ATP-Draw.

Dimensão dos Trechos		
L1 (km)	**L2 (km)**	**L3 (km)**
72	108	50

5.4.2. Resultados

Os resultados obtidos com o método de localização de faltas em linhas com três terminais também são avaliados com base no erro de localização. As distâncias calculadas pelo método proposto são sempre encontradas em relação a uma das barras, sendo independente do local onde a falta ocorreu. Nos resultados apresentados a seguir, as distâncias de falta foram estimadas com relação ao terminal S, da Figura 5.5.

Consideraram-se nos testes do algoritmo de localização as seguintes condições:

- Faltas tipo fase A-terra.
- Variações da resistência de falta de 0 Ω, 20 Ω, 50 Ω e 100 Ω.
- Variações da distância à falta de:
    - 10 km, 36 km, 62 km – localizadas no trecho L1 e medidas em relação ao terminal S.
    - 82 km, 126 km, 170 km – localizadas no trecho L2 e medidas em relação ao terminal S.
    - 83 km, 97 km, 112 km – localizadas no trecho L3 e medidas em relação ao terminal S.
- Ângulos de incidência de 0° e 90°.
- L_1, L_2 e L_3 possuem as mesmas impedâncias.

É importante ressaltar que os dados de tensão e corrente fornecidos pelas simulações no ATP estão sincronizados. Mesmo assim, aplica-se o algoritmo de sincronização a estes dados, visando a validar a proposta de localização no tempo apresentada neste trabalho. As tabelas 5.9 a 5.16 apresentadas a seguir representam os resultados obtidos para localização de faltas em linhas com três terminais, considerando as

condições determinadas anteriormente. A distância real especificada na tabela refere-se à distância em relação ao terminal S.

Tabela 5.9. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 0 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s.

Distância Real (km)	**Trecho Real de Incidência**	**Instante de incidência estimado (s)**	**Distância Estimada (km)**	**Trecho Estimado de Incidência**	**Erro de localização (%)**
10	L_1	0,0205	9,80	L_1	0,11
36	L_1	0,0205	35,85	L_1	0,08
62	L_1	0,0202	62,03	L_1	0,02
82	L_2	0,0202	82,03	L_2	0,02
126	L_2	0,0202	126,06	L_2	0,03
170	L_2	0,0205	170,31	L_2	0,17
83	L_3	0,0202	82,96	L_3	0,03
97	L_3	0,0205	97,06	L_3	0,05
112	L_3	0,0205	112,11	L_3	0,09

Tabela 5.10. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 20 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s.

Distância Real (km)	**Trecho Real de Incidência**	**Instante de incidência estimado (s)**	**Distância Estimada (km)**	**Trecho Estimado de Incidência**	**Erro de localização (%)**
10	L_1	0,0205	8,93	L_1	0,59
36	L_1	0,0205	34,40	L_1	0,89
62	L_1	0,0202	62,04	L_1	0,02
82	L_2	0,0202	82,03	L_2	0,02
126	L_2	0,0201	126,55	L_2	0,31
170	L_2	0,0210	168,06	L_2	1,07
83	L_3	0,0202	82,96	L_3	0,03
97	L_3	0,0205	98,05	L_3	0,86
112	L_3	0,0212	110,33	L_3	1,37

Tabela 5.11. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas pata faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 50 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s.

Distância Real (km)	**Trecho Real de Incidência**	**Instante de incidência estimado (s)**	**Distância Estimada (km)**	**Trecho Estimado de Incidência**	**Erro de localização (%)**
10	L_1	0,0213	5,02	L_1	2,77
36	L_1	0,0210	32,25	L_1	2,08
62	L_1	0,0202	62,07	L_1	0,04
82	L_2	0,0202	82,04	L_2	0,02
126	L_2	0,0202	127,24	L_2	0,69
170	L_2	0,0211	175,13	L_2	2,85
83	L_3	0,0202	82,95	L_3	0,04
97	L_3	0,0208	99,48	L_3	2,03
112	L_3	0,0215	108,27	L_3	3,06

Tabela 5.12. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 100 Ω, ângulo de incidência de 0°, no instante 0,02 s.

Distância Real (km)	**Trecho Real de Incidência**	**Instante de incidência estimado (s)**	**Distância Estimada (km)**	**Trecho Estimado de Incidência**	**Erro de localização (%)**
10	L_1	0,0208	5,24	L_1	2,65
36	L_1	0,0205	33,72	L_1	1,54
62	L_1	0,0202	62,15	L_1	0,08
82	L_2	0,0202	82,05	L_2	0,03
126	L_2	0,0206	128,35	L_2	1,31
170	L_2	0,0213	174,82	L_2	2,68
83	L_3	0,0201	82,89	L_3	0,09
97	L_3	0,0213	100,6	L_3	2,95
112	L_3	0,0215	115,65	L_3	2,99

Tabela 5.13. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas par a faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 0 Ω, ângulo de incidência de 90°, no instante 0,017 s.

Distância Real (km)	Trecho Real de Incidência	Instante de incidência estimado (s)	Distância Estimada (km)	Trecho Estimado de Incidência	Erro de localização (%)
10	L_1	0,0171	9,71	L_1	0,16
36	L_1	0,0169	35,89	L_1	0,06
62	L_1	0,0169	61,89	L_1	0,06
82	L_2	0,0170	81,97	L_2	0,01
126	L_2	0,0171	126,18	L_2	0,10
170	L_2	0,0171	170,35	L_2	0,19
83	L_3	0,0170	82,97	L_3	0,02
97	L_3	0,0170	97,09	L_3	0,07
112	L_3	0,0171	112,23	L_3	0,19

Tabela 5.14. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 20, ângulo de incidência de 90°, no instante 0,017 s.

Distância Real (km)	Trecho Real de Incidência	Instante de incidência estimado (s)	Distância Estimada (km)	Trecho Estimado de Incidência	Erro de localização (%)
10	L_1	0,0172	7,80	L_1	1,22
36	L_1	0,0169	34,94	L_1	0,59
62	L_1	0,0171	60,96	L_1	0,58
82	L_2	0,0170	81,5	L_2	0,28
126	L_2	0,0171	127,10	L_2	0,61
170	L_2	0,0176	172,25	L_2	1,25
83	L_3	0,0169	82,96	L_3	0,03
97	L_3	0,0174	98,58	L_3	1,29
112	L_3	0,0178	114,13	L_3	1,75

Tabela 5.15. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 50 Ω, ângulo de incidência de 90°, no instante 0,017 s.

Distância Real (km)	Trecho Real de Incidência	Instante de incidência estimado (s)	Distância Estimada (km)	Trecho Estimado de Incidência	Erro de localização (%)
10	L_1	0,0179	4,94	L_1	2,81
36	L_1	0,0173	33,52	L_1	1,38
62	L_1	0,0173	59,52	L_1	1,37
82	L_2	0,0171	80,77	L_2	0,68
126	L_2	0,0175	128,52	L_2	1,40
170	L_2	0,0181	175,13	L_2	2,85
83	L_3	0,0169	82,95	L_3	0,04
97	L_3	0,0178	99,46	L_3	2,01
112	L_3	0,0177	114,47	L_3	2,03

Tabela 5.16. Resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra, resistência de falta igual a 100 Ω, ângulo de incidência de 90°, no instante 0,017 s.

Distância Real (km)	Trecho Real de Incidência	Instante de incidência estimado (s)	Distância Estimada (km)	Trecho Estimado de Incidência	Erro de localização (%)
10	L_1	0,0177	5,20	L_1	2,66
36	L_1	0,0179	31,18	L_1	2,68
62	L_1	0,0180	57,11	L_1	2,71
82	L_2	0,0178	79,55	L_2	1,36
126	L_2	0,0181	130,88	L_2	2,71
170	L_2	0,0178	174,82	L_2	2,68
83	L_3	0,0176	85,37	L_3	1,94
97	L_3	0,0175	99,33	L_3	1,91
112	L_3	0,0183	116,01	L_3	3,28

5.4.2.1. Considerações sobre os resultados apresentados

O equacionamento do algoritmo de localização de faltas em linhas de transmissão, apresentado no capítulo 4, resulta em dois valores para a distância de falta. A partir da análise desses dois valores de distância, encontram-se o local onde ocorreu a falta, em relação ao terminal S (conforme Figura 5.5), e o trecho em que ocorreu a falta.

Para uma falta no trecho L1, dois valores para a distância de falta são calculados. As distâncias estimadas consideradas nas tabelas anteriores para uma falta neste trecho, referem-se às distâncias que são obtidas pelas equações que dependem dos dados dos terminais S e R.

Para uma falta nos trecho L2 e L3, dois valores para a distância de falta também são calculados. Um dos valores é a própria distância de falta, enquanto que o outro tem a função de uma variável auxiliar que informa em qual dos trechos ocorreu a falta. Considerou-se um erro de até 5% no valor desta variável para indicação do trecho de falta.

Os erros de localização para faltas no trecho L1 e L2 foram calculados considerando o comprimento do trecho S – R. Os erros de localização para faltas no trecho L3 foram calculados considerando o comprimento do trecho S – T.

Os instantes de incidência estimados correspondem a maior discrepância observada entre o instante real de incidência da falta e o instante estimado pelo algoritmo de localização da falta no tempo proposto.

5.4.2.2. Análise dos Resultados

Pelos resultados apresentados nas tabelas anteriores, pode-se observar que o algoritmo foi eficiente na localização das faltas nas linhas e na identificação do trecho de ocorrência destas. Isso representa um ótimo resultado, visto que a localização de faltas em linhas com multi-terminais não é uma tarefa tão simples em virtude das ramificações representarem uma complexidade a mais na modelagem desses algoritmos.

Os resultados mostram ainda que o algoritmo não sofreu relevantes variações em sua precisão diante de fatores como ângulo de incidência e distância de falta, apresentando

em alguns casos pequena sensibilidade às resistências de faltas elevadas, principalmente no fim dos trechos S-R e S-T. A fim de investigar o motivo das divergências apresentadas, realizaram-se testes utilizando dados simulados e sincronizados pelo ATP, nos quais o algoritmo de localização de faltas mostrou-se muito preciso, com erros inferiores a 1%, sendo independente da resistência de falta. Com isto, percebeu-se que a sensibilidade à resistência de falta possivelmente ocorre no algoritmo de sincronização de dados e não no algoritmo de localização de faltas na linha, entretanto, outras fontes de erro também podem estar interferindo na exatidão dos resultados e, por isso, precisam ser melhor analisadas.

Embora alguns casos analisados tenham apresentado em um terminal da linha erros de até 23 amostras para indicação do instante de início da falta, observou-se que nos demais terminais o erro em número de amostras foi similar, o que não influenciou significativamente o erro de localização da falta na linha. Por exemplo, para uma falta fase A-terra no trecho L_2, com resistência de falta igual a 20 Ω, localizada a 170 km do terminal S, ângulo de incidência de 0°, observou-se que, nos três terminais, os instantes de início foram, respectivamente, 0,0205 s, 0,021 s e 0,0208 s, resultando em um erro de 1,07%.

Por fim, pode-se afirmar que a metodologia proposta nesta dissertação para determinação do local da falta em linhas com três terminais manteve uma precisão satisfatória, apresentando-se como uma ferramenta eficiente para determinação do local da falta.

5.5. Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados do método para localização de faltas em linhas de transmissão de dois e três terminais. Nos testes realizados em linhas de transmissão de dois terminais, utilizaram-se dados reais de sistemas de transmissão da CHESF. Nos testes feitos em linhas com três terminais, utilizaram-se dados simulados do ATP, nos quais variações na resistência de falta, na distância de falta e no ângulo de incidência foram analisadas na precisão do algoritmo. A metodologia de localização de faltas proposta mostrou-se uma ferramenta eficaz na localização de faltas em linhas com múltiplos terminais.

CAPÍTULO 6

Conclusões

6.1. Conclusões

Este trabalho apresentou um método de localização de faltas utilizando fasores fundamentais de tensão e de corrente de múltiplos terminais de uma linha de transmissão. A base de dados utilizada foi obtida por meio de registros oscilográficos de um sistema real de transmissão de energia e também por simulações através do software ATP.

A metodologia desenvolvida consiste de três etapas principais. A primeira etapa é a de obtenção dos sinais a serem analisados (sinais de tensão e corrente discretizados), sendo seguida pela etapa de processamento dos sinais, onde um método para identificação do instante de início da falta, baseado na Transformada Wavelet, é utilizado, sendo este responsável pela sincronização dos dados analisados. Após a obtenção dos sinais de tensão e corrente sincronizados, faz-se a extração dos fasores fundamentais pela Transforma Discreta de Fourier e, por fim, executa-se o algoritmo de localização de faltas na linha.

Um aspecto importante da abordagem é o fato de que esta possui um equacionamento simples, não necessitando de técnicas iterativas ou de recursos de

hardware avançados para solução do problema de localização de faltas. Os cálculos envolvem apenas manipulações algébricas de matrizes e vetores complexos.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, tanto para o algoritmo de determinação do instante de início da falta, quanto para o algoritmo de localização da falta na linha com dados de dois e três terminais. Para os casos testados, o algoritmo mostrou bons índices de precisão quando da variação de fatores como a localização do ponto de ocorrência da falta ao longo da linha de transmissão, ângulo de incidência e resistência de falta. O método desenvolvido se constitui, pois, uma ferramenta eficaz para localização de faltas em linhas de transmissão, utilizando dados provenientes de múltiplos terminais.

6.2. Recomendações

Durante as pesquisas e testes que resultaram no presente trabalho, observou-se uma possível influência da resistência de falta na precisão do algoritmo de sincronização de dados. É, portanto, interessante realizar uma investigação mais detalhada dos sinais que contém essa informação, bem como informações de outras possíveis fontes de erros, a fim de desenvolver uma técnica mais rigorosa de identificação dos instantes de início de falta.

Recomenda-se avaliar a identificação do instante de início da falta por outros métodos, com o objetivo de comparar a eficácia destes na precisão da localização de faltas.

Outro fator que se recomenda avaliar com o objetivo de validar o algoritmo de localização de faltas apresentado, é o desempenho deste em relação a outros tipos de faltas, como trifásicas, bifásicas, bifásicas-terra. Propõe-se a elaboração de exaustivos testes a fim de comprovar se a eficácia obtida para faltas fase-terra também se estende para esses outros tipos de falta.

Propõe-se ainda que nas simulações no ATP sejam adotadas representações mais realistas de cargas, como as do tipo PV e PQ, para análise dos curtos-circuitos, conforme OLIVEIRA e MEDEIROS JR (2010).

Referências Bibliográficas

AGGARWAL, R. K.; COURY, D. V.; JOHNS, A. T.; KALAM, A. *A Pratical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders*. IEEE Transaction on Power Delivery, v.8, n.3, p.874-883, Jul.1993.

BRAHMA, S. M. *Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 1325-1331, Abr. 2005.

BRAHMA, S. M. *New Fault Scheme for a Two Terminal Transmission Line Using Symchronized Phasor Measurements*. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition, p. 853-857, 2006.

C37.111-1999 - *IEEE Standart Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*. 1999.

CANDIDO, C. K. S. S. Classificação de Distúrbios na rede Elétrica Usando Redes Neurais e Wavelets. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

CHE, R.; LIANG, J. An Accurate Fault Location Algorith for Two-Terminal Transmission Lines Combined with Parameter Estimation. IEEE Power and Energy Engineering Conference, p. 1-4, 2009.

COURY, D. V. *Introdução aos Sistemas Elétricos de Potência*. Disponível em: <http://www.sel.eesc.sc.usp.br/protecao/apostilasep1.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2010.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. São Carlos: EESC-USP, 2007.

DALCASTAGNÊ, A. L. *Método Iterativo para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão a partir de Fasores Não-Sincronizados*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

DOMMEL, W. H. ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) – Theory Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1995.

ELHAFFAR, A.; LEHTONEN, M. *Travelling Waves Based Earth Fault Location in 400 kV Transmission Network Single End Measurement*. IEEE, 2004.

GAOUDA, A. M.; KANOUN, S. H.; SALAMA, M. M. A; CHIKHANI, A. Y. *Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement*. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 149 n. 3, p. 310-318, Maio 2002.

GIRGIS, A. A.; HART. D.G.; PETERSON, W.L. *A new fault location technique for two and three-terminal lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.7, n.1, p.98-107, Jan. 1992.

GONG, Q.; CHEN, Y.; ZHANG, C.; WANG, Z. *A Study of the Accurate Fault Location System for Transmission Line Using Multi-Terminal Signals*. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, v.4, p.2533-2538, 2000.

GRAPS, A. L. *An introduction to wavelets*. IEEE Computational Sciences and Engineering, Vol. 2, p. 50–61, 1995.

JOHNS, A. T; JAMALI, S. *Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines*. IEE Proceedings, v.137, Pt. C, n.6, p.395-402, Nov.1990.

KALAM, A. e JOHNS, A. T. *Accurate Fault Location Technique for Multi-terminal EHV Lines*. IEE International Conference on Advantages in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, p.420-424, Nov.1991.

LIAO, Y.; KANG, N. *Fault-Location Algorithms Without utilizing Line Parameters Based on the Distributed Parameter Line Model*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, n. 2, p. 579-584, Abr. 2009.

LIU, CHIH-WEN; LIEN, KAI-PING; CHEN, CHING-SHAN; JIANG, JOE-AIR. *A Universal Fault Location Technique for N-Terminal (N ≥ 3) Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, n. 3, p. 1366-1373, Jul. 2008.

MACHADO, R. N. M. *Detecção, Classificação e Quantificação automática de variações de tensão de Curta Duração para Aplicação em Análise de Pós-Operação em Sistemas de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, 2006.

MALLAT, S. G. *A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989.

MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G., POGGI, Jean-Michel. *Wavelet Toolbox™ User's Guide*. The MathWorks, Inc., 2007.

MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G., POGGI, Jean-Michel. Wavelet Toolbox For Use with MATLAB®. User's Guide Version 2, The MathWorks, Inc., 2000.

NOVOSEL, D.; HART, D. G.; UDREN, E., GARITTY, J. *Unsynchronized Two-Terminal Fault Location Estimation*. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 11, n. 1, p. 130-138, Jan. 1996.

OLIVEIRA, J. C. D. *Projeto SIDAQEE - Capitulo II Qualidade de Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade*. Universidade Federal de Uberlândia, 2000.

OLIVEIRA, J. T.; MEDEIROS JR, M. F. *Modelos de Dispositivos de Controle para Implementação de Barras PQ e PV no ATP*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, 2010.

PARAMESWARIAH, C.; COX, M. *Frequency Characteristics of Wavelets*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, n. 3, p. 800-804, Jul. 2002.

RADOJEVIÉ, Z.; TERZIJA, V. *Two Terminals Numerical Algoritm for Fault Distance Calculation and Fault Analysis*. IEEE Power Systems Conference and Exposition, p. 1037-1042, 2006.

SANTOS, C. K. S. *Caracterização de Distúrbios em Redes de Energia Elétrica Através da Transformada Wavelet de Segunda Geração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.

SILVA, M. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria das Ondas viajantes e Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2003.

SILVA, M.; COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; SEGATTO, E. C. *An Alternative Fault Location Algorithm Based on Wavelet Transforms for Three-Terminal Lines*. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, p. 1-7, 2008.

SMITH, S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, USA, 1999.

STEVENSON Jr, W. D. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. McGrawHill do Brasil, Edição 2, São Paulo, 1986.

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

ZAMORA, I.; MINAMBRES, J. F.; MAZON, A. J.; ALVAREZ-ISASI, R.; LAZARO, J. *Fault Location on Two-Terminal Transmission Lines Based on Voltages*. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distributions, v.143, n.1, p.1-6, Jan.1996.

ANEXO 1
O FORMATO COMTRADE

Os arquivos em formato COMTRADE são os padronizados pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) para oscilografia digital. O COMTRADE define um formato comum para arquivos de dados digitais e mídias, necessários para troca de vários tipos de dados de perturbações, ensaios e simulação. Os arquivos definidos por este tipo devem estar, a princípio em formato ASCII, onde para cada evento são definidos quatro tipos de arquivos: cabeçalho, configuração, dados e informação. Estão na forma "xxxxxxxx.yyy"onde "xxxxxxxx"é usado para identificar o evento e ".yyy"é usado para identificar o tipo do arquivo: ".HDR" para cabeçalho, ".CFG" para configuração, ".DAT" para dados e ".INF" para informação (C37.111-1999, 1999).

Arquivos de Cabeçalho

O arquivo de cabeçalho é um arquivo tipo texto que fornece informações ao usuário para o melhor entendimento do evento gravado. Exemplos de informações que podem ser incluídas nesse arquivo são: nome da subestação; identificação de linhas, transformadores, reatores, etc.; resistências e reatâncias de seqüência positiva e zero; entre outras.

Arquivos de Configuração

Devem ser lidos por um programa de computador e seu formato, definido por norma, deve ser obedecido à risca. Possui informações que permitirão interpretar corretamente o arquivo de dados. Estas informações incluem itens como: taxas de amostragem, número de canais, freqüência da linha, informação dos canais, etc.

Arquivos de Dados

Contém o valor de cada amostra de cada canal medido. No arquivo de configuração são especificados meios de traduzir estes valores adequadamente para grandezas reais, tais como Volts, Ampères etc. Além dos dados representando as entradas analógicas, também são representadas as entradas digitais, que mostram o estado dos dispositivos de proteção e são representadas por "1" ou "0" no arquivo de dados.

Arquivos de Informação

Os arquivos de informação são opcionais e contém informações extras a respeito dos eventos gravados nos demais arquivos. Podem conter informações como comprimento e impedância da linha, tensão de operação, canais usados para medição de tensão e corrente, entre outras.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo