

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS
VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
TRÊS TERMINAIS – ABORDAGEM BASEADA EM
DECOMPOSIÇÃO WAVELET**

MARCEL FERNANDO DA COSTA PARENTONI

Itajubá, Dezembro de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE TRÊS TERMINAIS – ABORDAGEM BASEADA EM DECOMPOSIÇÃO WAVELET

MARCEL FERNANDO DA COSTA PARENTONI

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. PAULO MÁRCIO DA SILVEIRA

Universidade Federal de Itajubá

CO-ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. JOSÉ POLICARPO GONÇALVES de ABREU

Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, Dezembro de 2006

DEDICATÓRIA

*A Meus Pais, Denir E Fernando,
E, À Minha Irmã, Camila,
Com Admiração E Amor.*

AGRADECIMENTOS

- À toda minha família, em especial, a meus pais, Denir Aparecida da Costa Parentoni e Antonio Fernando Bartolomei Parentoni, pelo apoio incondicional e pela confiança em mim depositada. Pessoas que lutaram, por vezes até mais do que eu, para a realização deste trabalho.
- À minha irmã, Camila da Costa Parentoni, pelo carinho.
- Aos professores Paulo Márcio da Silveira e José Policarpo Gonçalves de Abreu, pelo trabalho de orientação, apoio e ensinamentos proporcionados.
- À Universidade Federal de Itajubá, pelo ensino de extrema qualidade.
- Ao GQEE – Grupo de Estudos em Qualidade da Energia Elétrica, pela confiança no meu trabalho e pelo suporte estrutural e educacional.
- Aos colegas de trabalho do GQEE, pelo companheirismo e pela importante contribuição no desenvolvimento deste trabalho.
- Aos colegas das minhas duas Repúblicas, de ontem e de hoje, pela amizade e pelos momentos de lazer.
- Aos colegas de Itapira, pela, sempre sincera e verdadeira, amizade.
- Às verdadeiras amigas conquistadas em solo itajubense. Que elas sejam estendidas à eternidade, apesar da distância entre nós.
- À CAPES e ao GQEE pelo apoio financeiro.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho de dissertação de mestrado é o desenvolvimento e a avaliação de algoritmos computacionais para localizar faltas tipo fase-terra em linhas de transmissão de três terminais (circuito T).

Todo o desenvolvimento é feito com base na teoria das ondas viajantes e na aplicação da transformada *wavelet*.

Dois métodos para a localização de faltas são propostos: o primeiro utilizando dados de dois terminais e o segundo de apenas um terminal.

Os métodos implementados são avaliados por meio de dados oriundos de simulações computacionais executadas no ATP (*Alternative Transients Program*) e no Simulink do Matlab.

Mediante um razoável conjunto de dados simulados, considerando diversas alterações de características de sistemas, de faltas e de condições de simulação, erros são obtidos e comparados com abordagens existentes.

As conclusões são apresentadas com base na exatidão dos aplicativos e sugestões são feitas para a melhoria dos algoritmos desenvolvidos.

Palavras-chave: Localização de Faltas; Circuito T; Ondas Viajantes; Transformada *Wavelet*.

ABSTRACT

The main objective of this MSc. dissertation is the development and evaluation of computational algorithms to locate earth-ground faults in three terminal transmission lines (Teed Circuits).

The development is made based on the travelling wave theory and on the application of the *wavelet* transform.

Two fault location methods are proposed: the former uses data of two terminals, and the latter, of only one terminal.

The implemented methods are evaluated through simulations run in ATP (*Alternative Transients Program*) and in Matlab's Simulink.

Based on the simulated data, considering several changes of the system characteristics, of faults and of simulation conditions, errors are obtained and compared with existing method.

Conclusions are presented based on the accuracy of the applications and suggestions are made aiming at improvements on the developed algorithms.

Keywords: Fault Location; Teed Circuit; Traveling Waves; *Wavelet* Transform.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
SUMÁRIO	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xii
1 <i>Introdução</i>	1
1.1 Considerações Iniciais	2
1.2 Relevância do Tema	2
1.3 Abordagem principal e objetivos	3
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2 <i>Revisão Bibliográfica</i>	6
2.1 Considerações Iniciais	7
2.2 Localização de Faltas em Linhas de Dois Terminais	7
2.3 Localização de Faltas em LTs com Três Terminais	13
2.3.1 Uso da Teoria das Ondas Viajantes	13
2.3.2 Utilizando Outras Técnicas	14
2.4 Considerações Finais	17
3 <i>Transformada Wavelet e Outras Ferramentas</i>	18
3.1 Considerações Iniciais	19
3.2 Transformada Wavelet	19
3.2.1 Comentários Iniciais	19
3.2.2 Evolução Histórica (Graps, 1995b)	20
3.2.3 Evolução Técnica	20
3.2.3.1 Transformada de Fourier	21
3.2.3.2 Transformada de Fourier de Curto Tempo	23
3.2.3.3 Transformada <i>Wavelet</i>	24
3.2.4 Transformada Wavelet Contínua	26
3.2.5 Transformada Wavelet Discreta	27
3.2.5.1 Análise multi-resolução	28
3.3 Outros Filtros Digitais	31
3.3.1 Filtros IIR (<i>Infinite Impulse Response</i>)	31
3.4 Transformação Modal	32
3.5 Considerações Finais	33
4 <i>Aplicação da Teoria das Ondas Viajantes na Localização de Faltas</i>	34
4.1 Considerações Iniciais	35
4.2 Teoria das Ondas Viajantes	35
4.2.1 Velocidade de propagação	36
4.2.2 Diagrama de Lattice	37
4.2.2.1 Faltas Não Envolvendo o Terra	37
4.2.2.2 Faltas Fase-Terra	38
4.3 Modelagem dos Sistemas Elétricos Estudados	41
4.3.1 LTs com Dois Terminais	42
4.3.1.1 Fontes	42
4.3.1.2 Linhas de Transmissão	43

4.3.1.3	Faltas.....	45
4.3.2	LTs com Três Terminais.....	46
4.4	Algoritmo de Localização de Faltas Fase-Terra em LTs de Dois Terminais.....	46
4.4.1	Localização de Faltas em LTs com Dois Terminais.....	46
4.4.1.1	Localização de Faltas na Primeira Metade da LT.....	47
4.4.1.2	Localização de Faltas na Segunda Metade da LT.....	48
4.4.1.3	Cálculo da Distância Preliminar.....	49
4.4.2	Funcionamento.....	50
4.5	Considerações Finais.....	53
5	<i>Métodos Propostos</i>	54
5.1	Considerações Iniciais.....	55
5.2	Método existente.....	56
5.3	Localização de Faltas em Sistemas com três Terminais Utilizando Dados de dois Terminais.....	57
5.3.1	Identificação do Ramo sob Falta.....	57
5.3.2	Localização da Falta.....	59
5.3.3	Comentários Sobre o Método.....	61
5.4	Localização de Faltas em Sistemas com três Terminais Utilizando Dados de apenas um Terminal.....	62
5.4.1	Pré-Identificação do Ramo sob Falta.....	62
5.4.2	Avaliação das Possibilidades e Identificação do Ramo sob Falta.....	63
5.4.3	Localização da Falta.....	67
5.5	Considerações Finais.....	69
6	<i>Resultados</i>	70
6.1	Considerações Iniciais.....	71
6.2	Linhas de Transmissão com 2 Terminais.....	71
6.2.1	Variação da Distância de Falta.....	72
6.2.2	Variação da Resistência de Falta.....	74
6.2.3	Variação do Ângulo de Incidência de Falta.....	75
6.2.4	Variação da Razão Sinal Ruído.....	78
6.2.5	Substituição da Transformada <i>Wavelet</i> por Filtros Digitais.....	82
6.3	Linhas de Transmissão com 3 Terminais.....	86
6.3.1	Monitoração nos 3 Terminais.....	86
6.3.2	Monitoração em 2 Terminais.....	90
6.3.2.1	Avaliação do Método.....	90
6.3.2.2	Análise das Piores Situações.....	99
6.3.2.3	Eficácia e Aplicabilidade do Método.....	100
6.3.3	Monitoração em 1 Terminal.....	100
6.3.3.1	Avaliação do Método.....	101
6.3.3.2	Análise das Piores Situações.....	103
6.3.3.3	Eficácia e Aplicabilidade do Método.....	104
6.3.4	Comparação Entre os Métodos.....	105
6.4	Considerações Finais.....	106
7	<i>Conclusões</i>	107
7.1	Conclusões e Contribuições.....	108
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	109
8	<i>Referências Bibliográficas</i>	110

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Algoritmo para a localização de faltas.	8
Figura 2.2 – Algoritmo para a localização de faltas.	11
Figura 2.3 – Diagrama de Lattice.	13
Figura 2.4 – Sistema elétrico estudado.	15
Figura 2.5 – Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas.	16
Figura 2.6 – Configuração do sistema localizador de faltas.	17
Figura 3.1 - Sinal de 60 Hz com transitório.	22
Figura 3.2 - Espectro de frequências do sinal.	22
Figura 3.3 - Transformada de Fourier de curto tempo.	23
Figura 3.4 - Transformada <i>Wavelet</i>	24
Figura 3.5 - Comparação entre STFT (a) e WT (b).	25
Figura 3.6 - Tipos de <i>wavelet</i> mãe.	26
Figura 3.7 - Diagrama tempo-escala.	27
Figura 3.8 - Faixas de frequência da estrutura piramidal.	30
Figura 3.9 - Aplicação da AMR no sinal exemplo.	31
Figura 3.10 – Diagrama esquemático do filtro.	32
Figura 4.1 – Falta em uma LT.	37
Figura 4.2 – Diagrama de Lattice para faltas fase.	37
Figura 4.3 – Diagrama de Lattice para faltas fase-terra.	38
Figura 4.4 – Sinais de tensão.	39
Figura 4.5 – Visualização aproximada dos sinais de tensão.	39
Figura 4.6 – Sinais desacoplados.	40
Figura 4.7 – Coeficientes <i>wavelet</i>	41
Figura 4.8 – Coeficientes <i>wavelet</i> ao quadrado.	41
Figura 4.9 – Diagrama de blocos no Matlab.	42
Figura 4.10 - Diagrama de blocos no ATP.	42
Figura 4.11 – Diagrama de Fonte.	43
Figura 4.12 – Diagrama de Falta.	45
Figura 4.13 – Diagrama correspondente ao Circuito T.	46
Figura 4.14 – Diagrama de Lattice para faltas na primeira metade da LT.	47
Figura 4.15 – Diagrama de Lattice para faltas na segunda metade da LT.	48
Figura 4.16 – Definição do limiar.	51
Figura 4.17 – Fluxograma do algoritmo de localização de faltas.	52
Figura 5.1 – Diagrama de simulação (ATP) de LT com três terminais.	55
Figura 5.2 – Diagrama de Lattice para faltas no ramo 1.	58
Figura 5.3 - Diagrama de Lattice para faltas no ramo 2.	59
Figura 5.4 - Diagrama de Lattice para faltas no ramo 3.	59
Figura 5.5 – Fluxograma do método proposto.	61
Figura 5.6 – Instantes de reflexão.	64
Figura 5.7 – Diagrama de Lattice para faltas na primeira metade das LTs.	65
Figura 5.8 – Diagrama de Lattice para faltas na segunda metade das LTs.	65
Figura 5.9 – Identificação da terceira reflexão de interesse.	66
Figura 5.10 – Fluxograma do método proposto.	68
Figura 6.1 – Sistema com dois terminais.	71
Figura 6.2 – Variação do erro em função da distância de falta.	73
Figura 6.3 – Transitórios para o ângulo de incidência de 0°.	76
Figura 6.4 – Transitórios para o ângulo de incidência de 90°.	76

Figura 6.5 – Sinal com SNR de 80 dB.....	78
Figura 6.6 – Sinal com SNR de 20 dB.....	79
Figura 6.7 – Reflexões de modo aéreo.	81
Figura 6.8 – Reflexões de modo terra.....	81
Figura 6.9 – Reflexões utilizando a transformada <i>wavelet</i>	83
Figura 6.10 – Reflexões utilizando o filtro IIR passa-alta.....	83
Figura 6.11 – Circuito T simulado.....	86
Figura 6.12 – Reflexões no terminal 1.....	87
Figura 6.13 – Reflexões no terminal 2.....	87
Figura 6.14 – Reflexões no terminal 3.....	88
Figura 6.15 – Reflexões de modo terra e aéreo no terminal 1.....	91
Figura 6.16 – Reflexões de modo terra e aéreo no terminal 2.....	91
Figura 6.17 – Reflexões do modo aéreo no terminal 2.....	92
Figura 6.18 - Reflexões do modo aéreo no terminal 1.....	93
Figura 6.19 - Reflexões do modo aéreo no terminal 2.....	93
Figura 6.20 – Diagrama de Lattice.	96
Figura 6.21 – Comparação de erros.....	105

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resultados.....	12
Tabela 4.1 – Dados reais da LT.....	44
Tabela 5.1 – Identificação do ramo sob falta.....	58
Tabela 5.2 – Valores calculados de t_3	66
Tabela 6.1 – Resultados para faltas em vários ponto da linha.....	72
Tabela 6.2 – Resultados para a falta a 20 km.....	74
Tabela 6.3 – Resultados para a falta a 40 km.....	74
Tabela 6.4 – Resultados para a falta a 70 km.....	75
Tabela 6.5 – Resultados para a falta a 90 km.....	75
Tabela 6.6 – Resultados para a falta a 20 km.....	77
Tabela 6.7 – Resultados para a falta a 35 km.....	77
Tabela 6.8 – Resultados para a falta a 70 km.....	77
Tabela 6.9 – Resultados para a falta a 110 km.....	77
Tabela 6.10 – Resultados para a falta a 30 km.....	79
Tabela 6.11 – Resultados para a falta a 100 km.....	80
Tabela 6.12 – Influência da frequência de corte escolhida.....	84
Tabela 6.13 – Comparação entre FD e TW.....	85
Tabela 6.14 – Resultados do método existente.....	89
Tabela 6.15 – Resultados do método proposto.....	94
Tabela 6.16 – Resultados de simulações variando os comprimentos dos ramos.....	95
Tabela 6.17 – Parâmetros de modelagem dos ramos.....	97
Tabela 6.18 – Resultados de simulações mudando a homogeneidade dos ramos.....	98
Tabela 6.19 – Resultados de simulações para faltas próximas ao ponto T.....	99
Tabela 6.20 – Resultados do método proposto.....	101
Tabela 6.21 – Resultados de simulações variando os comprimentos dos ramos.....	102
Tabela 6.22 – Resultados de simulações mudando a homogeneidade dos ramos.....	103
Tabela 6.23 - Resultados de simulações das piores situações.....	104

Lista de Abreviaturas e Símbolos

AMR	Análise Multi-Resolução
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CELINTRA	Software de cálculo de parâmetros de linhas de transmissão
Circuito T	Linha de transmissão com três terminais
CWT	<i>Continuous Wavelet Transform</i> (Transformada <i>Wavelet</i> Contínua)
d	Distância de falta
d_{pre}	Distância preliminar
dB	Decibel
db2	Tipo de <i>wavelet</i> mãe Daubechies número 2
db4	Tipo de <i>wavelet</i> mãe Daubechies número 4
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i> (Transformada <i>Wavelet</i> Discreta)
EMTP	<i>ElectroMagnetic Transient Program</i>
FT	<i>Fourier Transform</i> (Transformada de Fourier)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
LT(s)	Linha(s) de Transmissão
m	Metros
p.u.	Por unidade
\Re	Conjunto dos números Reais
RMS	Root Mean Square (valor eficaz)
s	Segundos
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Razão Sinal-Ruído)
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i> (Transformada de Fourier de Curto Tempo)
TW	Transformada <i>Wavelet</i>
v	Velocidade de propagação
V	Volt
WT	<i>Wavelet Transform</i> (Transformada <i>Wavelet</i>)
\mathbb{Z}	Conjunto dos números Inteiros
ϕ	Função escala
ψ	Função <i>Wavelet</i>

Capítulo 1

Introdução

“E pois ergamo-nos. Nós que amarelecemos nas noites desbotadas de estudo insano, vimos que a ciência é falsa e esquiva, que ela mente e embriaga como um beijo de mulher.”

Álvares de Azevedo

1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os principais objetivos da dissertação de mestrado, bem como descreve a estrutura utilizada ao longo do texto.

1.2 Relevância do Tema

A energia elétrica é um benefício que, além de fomentar o desenvolvimento econômico do país, proporciona bem-estar para as pessoas que dela se utilizam. Ela sempre foi de vital importância, tanto em setores residenciais e comerciais, quanto em setores industriais. O seu fornecimento deve ser o mais contínuo possível, evitando perdas de processo, principalmente industrial, acarretando diminuição da produtividade e enormes perdas financeiras.

Desta maneira, fica nítida a necessidade da qualidade da energia elétrica ser a melhor possível. No entanto, nenhum sistema por mais perfeito que seja é imune a ocorrências de faltas, haja vista que na maioria das vezes a ocorrência das mesmas possui causas naturais. Diante dessa realidade, deve-se trabalhar para que as faltas não perdurem por muito tempo no sistema elétrico, ou seja, as interrupções devem ser curtas e o procedimento de restauração executado com a maior eficiência possível.

Considerando que 75 a 80 % das faltas acontecem nas linhas de transmissão (LTs), a localização das mesmas de maneira rápida e precisa proporciona uma diminuição do tempo de reparo do sistema elétrico, possibilitando a restauração do fornecimento de energia elétrica no menor tempo possível, melhorando a confiabilidade, a disponibilidade e a eficiência econômica da rede.

Fica claro que a localização de faltas em LTs é um tema de grande pertinência dentro do contexto atual do sistema elétrico nacional e tem sido sempre abordado, tanto em trabalhos acadêmicos quanto em trabalhos práticos, tendo em vista ser um assunto que ainda requer contribuições envolvendo otimização: diminuição de custos e melhoria de benefícios.

Vários métodos de localização de faltas em LTs têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, dentre eles as técnicas baseadas na teoria das ondas viajantes têm sido de grande interesse de diversos pesquisadores. Neste trabalho são utilizados os métodos baseados na

teoria das ondas viajantes, opção essa com base nos resultados que vêm sendo obtidos por diversos pesquisadores nos últimos anos.

É sabido que o uso da teoria das ondas viajantes ainda é um tanto restrito a trabalhos acadêmicos, tendo em vista algumas dificuldades práticas, tais como necessidade de altas taxas de amostragem e transdutores especiais que deixem passar as variações abruptas do sinal. Contudo tais limitações vêm sendo resolvidas nos últimos anos a partir dos transdutores opto-elétricos e opto-magnéticos, bem como através do uso de conversores analógico/digital (A/D) de altíssima velocidade.

Em um futuro breve, localizadores de falta poderão inclusive trabalhar em tempo real, permitindo até mesmo seu uso como elemento de proteção.

1.3 Abordagem principal e objetivos

Este trabalho foi desenvolvido a partir das sugestões contidas na tese de doutorado de Silveira (2001). Dentre tais sugestões, uma delas diz respeito à localização de faltas em linhas de três terminais. Esse tipo de linha de transmissão (LT) possui um grau de complexidade maior, exigindo algoritmos especiais para a localização das faltas. Dentro desse contexto, a teoria das ondas viajantes e a utilização de técnicas usando a transformada *wavelet* são aplicadas.

O trabalho está dividido em duas partes a saber:

- Avaliação da influência de diferentes parâmetros na exatidão do cálculo da localização de faltas para LTs de dois terminais;
- Proposição de dois métodos para a localização de faltas em LTs de três terminais: o primeiro utilizando dados de dois terminais e o segundo de apenas um terminal. Ambos como alternativa ao método que usa dados dos três terminais, o qual será denominado ao longo do texto como “Método existente”.

Cabe mencionar ainda que toda ênfase é dada à faltas do tipo fase-terra. Primeiro por se tratar daquela que mais ocorre em LTs e segundo, por ser o tipo de falta que mais requer cuidados em função da existência de diferentes modos de propagação das ondas, bem como de refrações que não podem ser desconsideradas.

Os algoritmos são implementados em ambiente Matlab e diversas simulações de falta em modelos de LTs de dois e três terminais são avaliados. Tais simulações são realizadas tanto no ATP quanto no próprio Matlab.

Por fim, todos os resultados obtidos são analisados e ponderados os prós e contras encontrados em cada método. É levado em consideração também, além da exatidão dos resultados obtidos, o impacto econômico e a aplicabilidade de cada um dos métodos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está dividida em sete capítulos, a saber:

1. Introdução;
2. Revisão Bibliográfica;
3. Transformada Wavelet e Outras Ferramentas;
4. Aplicação da Teoria das Ondas Viajantes na Localização de Faltas;
5. Métodos Propostos;
6. Resultados;
7. Conclusões.

No Capítulo 1, são apresentados comentários sobre a relevância do tema e os objetivos do trabalho. Também é descrita a estrutura da dissertação de mestrado.

O Capítulo 2 (revisão bibliográfica) traz o estado-da-arte da localização de faltas utilizando a teoria das ondas viajantes. São descritos os métodos considerados e os resultados obtidos nos últimos anos, publicados em congressos, periódicos nacionais e internacionais.

O Capítulo 3 apresenta um estudo sobre algumas técnicas de processamento de sinais utilizadas ao longo do trabalho. É dada uma maior ênfase para a transformada *wavelet*, por ser essa a principal técnica considerada no desenvolvimento dos algoritmos aqui mencionados.

O Capítulo 4 trata da aplicação da teoria das ondas viajantes na localização de faltas em LTs. O principal objetivo desse capítulo é explicar como a distância de falta é obtida. Além disso, descreve-se sobre a modelagem do sistema elétrico simulado (fontes, LTs, faltas, etc.). Por fim, discute-se como o algoritmo de localização de faltas é implementado, seu funcionamento e aplicabilidade.

O Capítulo 5 apresenta os métodos propostos e explica o raciocínio utilizado no desenvolvimento de dois métodos para localização de faltas em LTs de três terminais. Uma avaliação é feita sobre a aplicabilidade de cada método.

O Capítulo 6 mostra e analisa os resultados de simulações computacionais das diversas situações de falta. São avaliados os impactos causados pela variação de alguns parâmetros, tais como distância de falta; resistência de falta; ângulo de incidência de falta; dentre outros. Paralelamente são avaliados e comparados os resultados obtidos utilizando os métodos propostos.

Por fim, o Capítulo 7 traz as conclusões do trabalho de dissertação comenta sobre as contribuições alcançadas e faz sugestões de melhorias para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

*“De cada um, de acordo com suas habilidades,
a cada um, de acordo com suas necessidades.”*

Karl Marx

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados alguns métodos de localização de faltas fazendo uso das ondas viajantes e da transformada *wavelet*. Para cada método, são descritos os procedimentos utilizados para a obtenção do local de falta.

2.2 Localização de Faltas em Linhas de Dois Terminais

Magnago (1998) publicou um método que utiliza a teoria das ondas viajantes objetivando determinar a localização da falta. A transformada *wavelet* é aplicada para a análise dos transitórios indicando então o intervalo de tempo que uma onda leva para percorrer a distância entre o ponto de falta e o terminal.

No caso em que seja possível obter dados sincronizados (via GPS) de ambos os terminais da LT, a distância de falta é dada pela expressão (2.1).

$$d = \frac{L - v_m t_d}{2} \quad (2.1)$$

onde d é a distância de falta, L é o comprimento da LT, t_d é o intervalo de tempo entre duas reflexões das ondas viajantes e v_m é a velocidade da onda viajante no modo m , conforme será explicado oportunamente.

Por outro lado, com apenas os dados de um terminal, é necessário diferenciar as faltas que não envolvem o terra e aquelas que envolvem. Para essas últimas, lança-se mão da expressão (2.2).

$$d = \frac{v_m t_d}{2} \quad (2.2)$$

Se a falta envolve o terra e acontece na primeira metade da LT, a expressão (2.2) é válida. Porém, se tal tipo de falta ocorrer na segunda metade, a expressão (2.3) deve ser considerada.

$$d = \frac{v_m(2\tau - t_d)}{2} \quad (2.3)$$

onde τ é o tempo que a onda leva para percorrer toda a linha.

A transformada *wavelet* é aplicada nos sinais registrados nos terminais da LT onde, através dos coeficientes *wavelet*, determina-se automaticamente se a falta envolve o terra ou não, bem como se a falta está na primeira ou na segunda metade da linha. O fluxograma da Figura 2.1 ilustra a referida técnica.

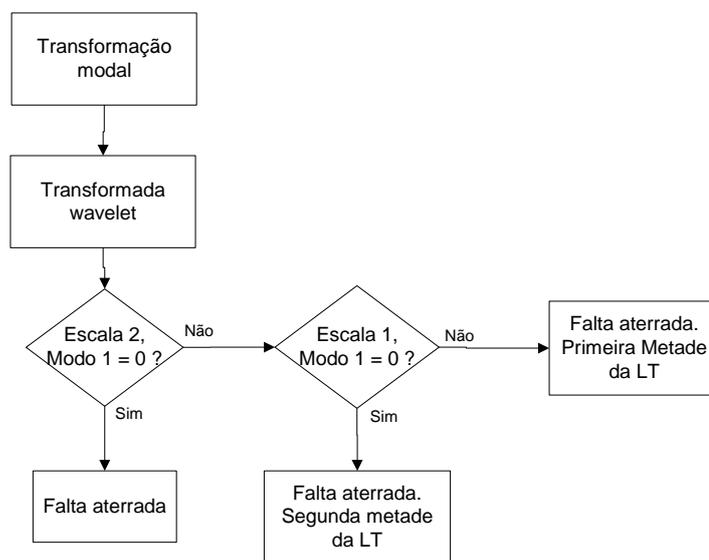


Figura 2.1 – Algoritmo para a localização de faltas.

Os resultados obtidos através da aplicação do método em sinais simulados são considerados razoáveis para todas as situações discutidas, tendo como erro máximo 1,3 %.

Jian (1998) apresenta um método baseado na utilização da teoria das ondas viajantes lançando mão da transformada *wavelet* contínua. Dados dos dois terminais da LT são usados. O método trabalha em função da determinação de um fator η , de acordo com a expressão (2.4).

$$\eta = \frac{|t_2 - t_1|}{T_l} \quad (2.4)$$

onde $T_l = \frac{l}{v_c}$ e v_c é a velocidade da luz.

Se η for pequeno utilizam-se as expressões (2.5) e (2.6) para o cálculo da distância de falta. Assim, para uma LT de dois terminais,

$$d_1 = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (2.5)$$

$$d_2 = \frac{L - (t_1 - t_2)v}{2} \quad (2.6)$$

onde t_1 e t_2 são os tempos de chegada das ondas viajantes nos terminais 1 e 2 respectivamente.

Por outro lado, se η for grande, define-se dois tempos de chegada (t_1, t_2) e duas velocidades (v_1, v_2) , reforçando dessa forma as diferenças entre os dados dos dois terminais da linha. As expressões (2.7) e (2.8) permitem localizar tais faltas.

$$d_1 = \frac{v_1 v_2 (t_2 - t_1) + v_1 L}{v_1 + v_2} \quad (2.7)$$

$$d_2 = \frac{v_1 v_2 (t_2 - t_1) + v_2 L}{v_1 + v_2} \quad (2.8)$$

O método foi avaliado através de simulação de um sistema elétrico considerando uma LT de 500 kV. Os resultados obtidos foram satisfatórios, principalmente para locais de falta muito próximos ao início da linha, onde geralmente são encontrados os maiores erros.

Nos trabalhos desenvolvidos por Silveira (2001, 2001b, 2002) é apresentado um método de localização de faltas em LTs baseado na teoria das ondas viajantes. O método é aplicado em LTs com dois terminais e são utilizados os registros de tensão das três fases de um dos terminais. Esses sinais de tensão são transformados em três outros sinais, com o intuito de eliminar o efeito do acoplamento mútuo entre eles. Uma transformação modal é realizada para tal operação, obtendo-se dois sinais de modo aéreo e um sinal de modo terra.

Sobre os sinais resultantes aplica-se uma ferramenta matemática para extrair as partes de interesse de cada sinal, no caso, os transitórios de alta frequência. A transformada *wavelet* discreta realiza tal procedimento com muita propriedade, definindo diferentes faixas de frequência a cada nível de decomposição.

Na seqüência os coeficientes *wavelet* são usados para obter um detalhamento maior das discontinuidades contidas no sinal. Descontinuidades que são as reflexões das faltas, base da teoria das ondas viajantes.

A partir da determinação dos instantes das duas primeiras reflexões no modo aéreo (t_{A1} e t_{A2}), a distância da falta é calculada, de acordo com a expressão (2.9).

$$d = \frac{v(t_{A2} - t_{A1})}{2} \quad (2.9)$$

onde v é a velocidade de propagação das ondas viajantes no modo aéreo.

O método se revelou bastante eficiente para todos os tipos de circuito simulados, sendo que a maioria dos erros encontrados ficou abaixo do patamar de 1 %.

Em (Makming, 2002), é apresentado um novo método de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão, também usando a transformada *wavelet*. O método utiliza os sinais de corrente das três fases, os quais são transformados em componentes seqüenciais. Esses componentes são decompostos através da transformada *wavelet*. Usando os coeficientes originados do componente de seqüência positiva, torna-se possível extrair o intervalo de tempo entre duas frentes de onda de modo aéreo.

Uma vez encontrado o intervalo de tempo, a distância da falta é obtida, como mostra a expressão (2.10).

$$d = \frac{(L - v(t_2 - t_1))}{2} \quad (2.10)$$

onde L é o comprimento da LT, v é a velocidade de propagação no modo aéreo, e $t_2 - t_1$ é o intervalo de tempo entre duas reflexões da onda viajante.

A Figura 2.2 ilustra o algoritmo utilizado para esta abordagem.

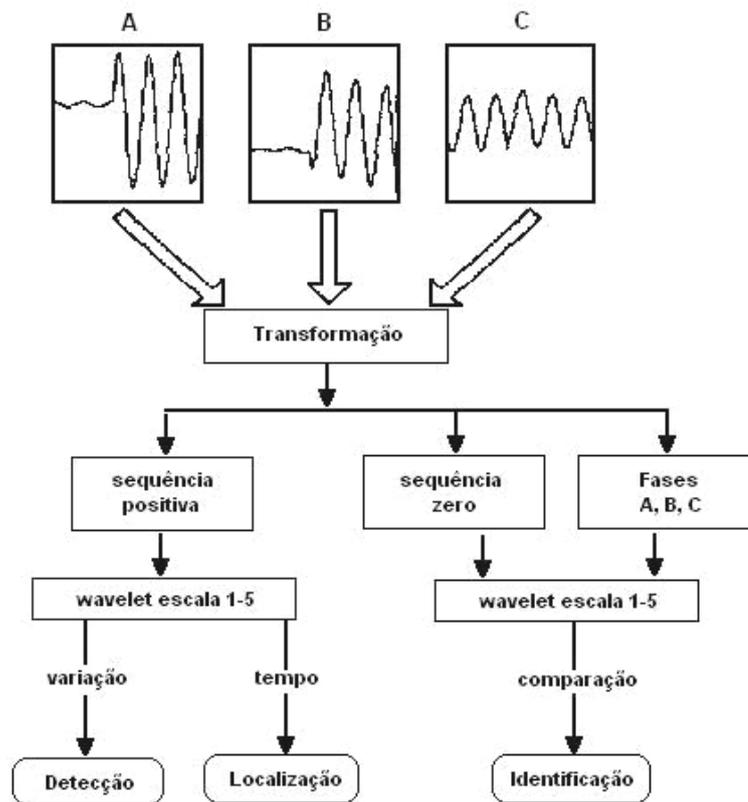


Figura 2.2 – Algoritmo para a localização de faltas.

Esta metodologia é avaliada através de simulações computacionais. Os erros registrados se mantiveram na faixa de 0,1 a 1,9 %.

Em (Yi-Zhuang, 2002), é proposto um método que estima inicialmente a distância de falta através da utilização da teoria das ondas viajantes e compara os resultados obtidos com uma outra técnica denominada Root-Music, usada para análise dos transientes presentes no sinal da tensão. Tal técnica também se baseia na propagação de ondas entre o ponto de falta e o terminal sob monitoração. Quando uma perturbação atinge o ponto de falta, essa é refletida para o mesmo terminal. Depois, novamente, é refletida para o ponto de falta e retorna ao mesmo terminal.

Sendo t o tempo de propagação entre o terminal e o ponto de falta, a frequência de eliminação da perturbação é dada pela equação (2.11).

$$f = \frac{1}{4t} \quad (2.11)$$

Desta maneira a distância da falta é calculada conforme (2.12).

$$d = \frac{v}{4f} \quad (2.12)$$

onde v é a velocidade de propagação no modo aéreo da perturbação.

Quando as posições da falta calculadas pelos dois métodos são diferentes, é possível ponderar os dois resultados, de acordo com a expressão (2.13), melhorando a estimativa.

$$d = \frac{d_1}{l} d_1 + \frac{l - d_1}{l} d_2 \quad (2.13)$$

onde d_1 e d_2 são as distâncias calculadas pelo método baseado na teoria das ondas viajantes e pelo método Root-Music, respectivamente, e l é a metade do comprimento da LT.

Os resultados obtidos através da simulação de um sistema com uma LT de 342 km, utilizando o EMTP, são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resultados.

Distância da falta [km]	d_1 [km]	d_2 [km]	d [km]
10	13,27	10,13	10,31
30	33,72	30,47	31,04
60	62,93	61,14	61,77
100	100,90	98,15	99,76
171	171,00	168,63	171,00

Como é observado pela Tabela 2.1, o método traz uma resposta com boa exatidão para várias posições de falta ao longo da LT.

Elhaffar (2004) mostra a investigação do problema de localização de faltas, utilizando os transitórios dos sinais de corrente obtidos em um terminal da LT. O método discutido também utiliza a decomposição em componentes modais, bem como a transformada *wavelet* para evidenciar os componentes de alta frequência. A distância de falta é encontrada sabendo-se a velocidade das ondas viajantes e o intervalo de tempo entre duas reflexões de 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.

2.3 Localização de Faltas em LTs com Três Terminais

2.3.1 Uso da Teoria das Ondas Viajantes

Em (Evrenosoglu, 2005) é descrito um algoritmo de localização de faltas para LTs de 3 terminais, também denominadas de sistemas ou circuitos T, que utiliza a transformada *wavelet* para analisar transitórios nos sinais de falta.

A localização de faltas em circuitos T envolve basicamente dois passos: (i) identificar o ramo sob defeito; (ii) localizar a falta.

No primeiro passo os coeficientes *wavelet* dos modos aéreos dos três terminais são comparados, obtendo-se aquele de maior amplitude. Esse coeficiente normalmente indica o ramo da LT sob falta.

Para um melhor entendimento desta abordagem, a Figura 2.3 mostra o circuito T e o diagrama de Lattice* para dois casos de falta.

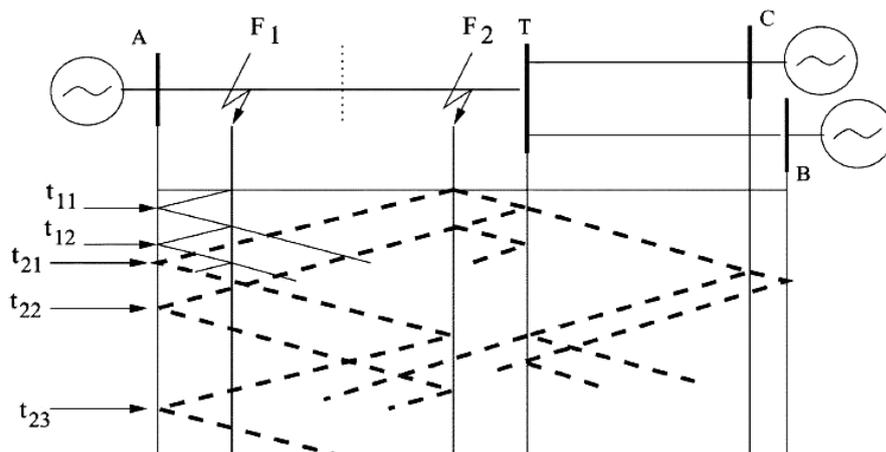


Figura 2.3 – Diagrama de Lattice.

Tomando-se inicialmente a falta F_1 , obtém-se a distância dela através da medida do intervalo de tempo $t_{12} - t_{11}$, pois a falta está na primeira metade da linha. Já para a falta F_2 ,

* Mais detalhes do diagrama de Lattice serão apresentados no Capítulo 4.

tem-se que considerar o intervalo $t_{23} - t_{21}$, para se obter o valor correto da distância da falta. O intervalo $t_{22} - t_{21}$ poderia também ser utilizado desde que a distância de falta calculada fosse subtraída do comprimento do ramo da LT em questão. Simulações computacionais em ambientes ATP/EMTP e Matlab são apresentadas para comprovar a capacidade do método. O método implementado se mostrou adequado para todos os casos avaliados. Apesar dos bons resultados, o método utiliza os registros dos três terminais do sistema T, o que deve ser evidenciado como uma desvantagem, haja vista a necessidade de três equipamentos de monitoração onerando, portanto, a implantação do sistema. É importante enfatizar que o método em questão é um dos poucos trabalhos encontrados na literatura especializada que trata da localização de faltas em sistemas T usando transformada *wavelet* e ondas viajantes. Outros poucos trabalhos derivam do mesmo. Por tal motivo este método será neste texto denominado de método existente.

Outros métodos comentados a seguir utilizam outras abordagens, porém é pertinente relatá-los para se ter uma idéia mais abrangente do problema aqui abordado. Dentre as técnicas usadas destacam-se: medição fasorial e técnicas heurísticas como, por exemplo, uso de redes neurais.

2.3.2 Utilizando Outras Técnicas

Girgis (1992) apresenta um método computacional para a localização de faltas em LTs de alta tensão com dois e três terminais. O método é baseado nos dados de tensão e corrente dos terminais das LTs e é utilizado em modo *on-line*, após a operação dos relés, ou em modo *off-line*, a partir dos dados registrados nos terminais. O sistema analisado é mostrado pela Figura 2.4, podendo a falta estar em qualquer um dos ramos. Uma vez que os dados dos três terminais estejam sincronizados, o cálculo da distância de falta é realizado com base nas equações das tensões nos terminais, como mostra a expressão (2.14).

$$\begin{aligned} V_{abc1} &= VF_{abc} + DZ_{abc1}I_{abc1} \\ V_{abc2} &= VF_{abc} + L_2Z_{abc2}I_{abc2} + (L_1 - D)Z_{abc1}(I_{abc2} + I_{abc3}) \\ V_{abc3} &= VF_{abc} + L_3Z_{abc3}I_{abc3} + (L_1 - D)Z_{abc1}(I_{abc2} + I_{abc3}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

onde as variáveis podem ser identificadas na Figura 2.4.

Desenvolvendo as expressões mostradas em (2.14), chega-se ao valor da distância de falta D .

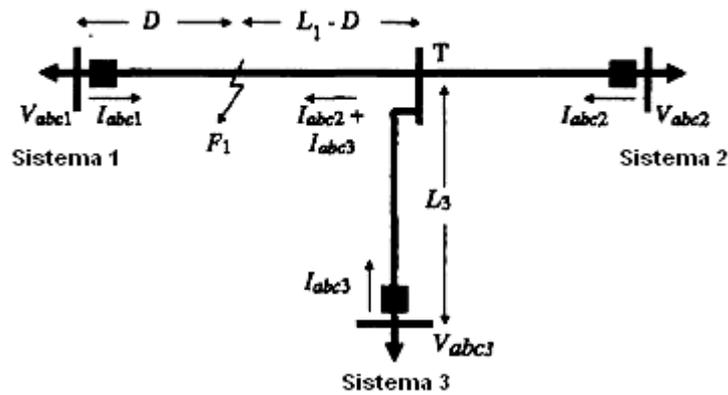


Figura 2.4 – Sistema elétrico estudado.

Para medidas não-sincronizadas o artigo em questão também apresenta um método de redução do erro causado pela falta de sincronização. A técnica foi testada por simulações no EMTP e os resultados mostraram a eficácia do método. Os maiores erros foram encontrados quando os dados não eram sincronizados, atingindo o patamar de 2 %. Por outro lado, com medidas sincronizadas, os erros foram em média 0,5 %.

Aggarwal (1993) traz uma abordagem alternativa para a localização precisa de faltas em circuitos T. A técnica desenvolvida utiliza sinais de tensão e de corrente dos três terminais do sistema. Esse método se mostra bastante insensível a variações de impedância das fontes e às alterações de configuração das linhas, até mesmo para linhas não transpostas. A Figura 2.5 mostra um diagrama de blocos do algoritmo utilizado para a localização de faltas. A etapa de identificação é feita com base nas diferenças apresentadas pelos sinais de tensão dos três terminais. Em seguida a distância da falta é calculada com os dados do terminal mais próximo. Cinco configurações diferentes de circuitos T foram simuladas. Para todas elas, bem como todas faltas simuladas, a magnitude encontrada para o erro foi sempre menor do que 2 %. Resultados que provam a eficácia do método apresentado.

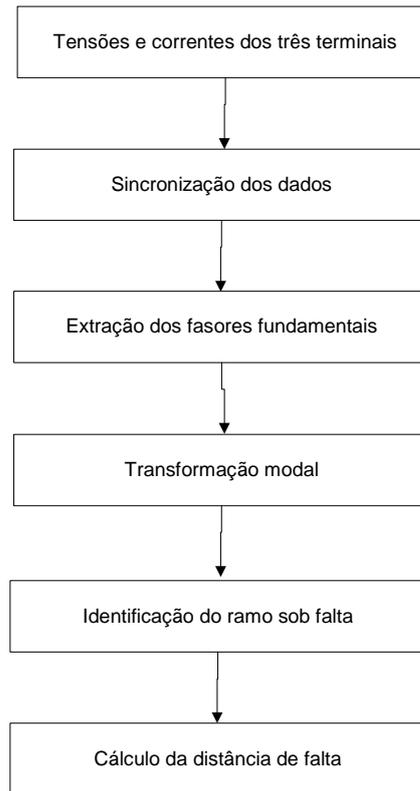


Figura 2.5 – Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas.

Em (Lai, 2000), é proposta uma técnica para a localização de faltas em circuitos T utilizando transformada *wavelet* e redes neurais. Simulações de falta são realizadas em ambiente EMTP utilizando um modelo de LT dependente da frequência. De posse dos sinais de tensão e corrente de um terminal da LT é feita uma análise utilizando a transformada *wavelet* com o objetivo de definir o padrão de treinamento para a rede neural.

Os autores concluem que, dependendo da *wavelet* mãe utilizada, os resultados alcançados pela técnica se aproximam bastante do resultado esperado para a distância de falta.

É proposta por Lin (2002) outra abordagem para a localização de faltas em sistemas com três terminais. Utilizando-se da precisão fornecida por unidades de medição fasorial (PMUs), bem como de dados medidos em dois dos três terminais, a técnica proposta apresenta-se capaz de calcular a distância da falta. O método fica melhor compreendido visualizando o diagrama de blocos da Figura 2.6. O desempenho desse localizador de faltas é demonstrado através de simulações em ambiente EMTP/ATP. Os resultados das simulações mostram que a exatidão se mantém mesmo sob variações de diversos parâmetros: resistência de falta; local de falta; tipo de falta; impedância das fontes; condições pré-falta.

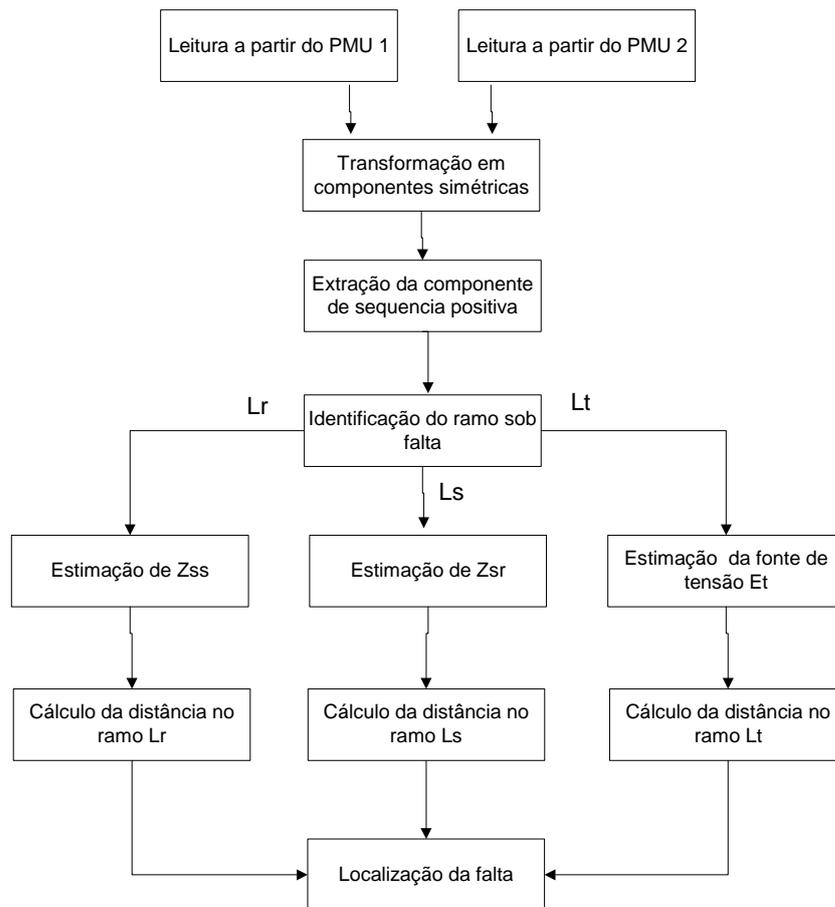


Figura 2.6 – Configuração do sistema localizador de faltas.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas algumas técnicas para a obtenção da distância de falta em LTs focando o uso da transformada *wavelet* e ondas viajantes. Em sistemas de transmissão de dois terminais as técnicas apresentadas demonstram serem factíveis para uso. No entanto, não são muitas as publicações que abordam o problema de localização de faltas em linhas com três terminais, principalmente, usando a abordagem de ondas viajantes. Sabe-se que o uso de métodos sincronizados via GPS melhora substancialmente a eficiência e a exatidão da localização, porém são onerosos tendo em vista a exigência de resolução no tempo (ordem de μs) dos sincronizadores. Mesmo para sistemas não sincronizados, a necessidade de instalação de três registradores também onera o custo final. Considerando a carência de informações para este tipo de problema, um maior esforço de pesquisa se faz necessário. Mais um dos motivos desta dissertação de mestrado.

Capítulo 3

Transformada Wavelet e Outras Ferramentas

*“As obras-primas devem ter sido geradas
por acaso; a produção voluntária não
vai além da mediocridade.”*

Carlos Drummond de Andrade

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo faz-se a introdução da base teórica da transformada *wavelet*, ferramenta essa usada para detectar os instantes em que as ondas viajantes chegam aos terminais de interesse do localizador de faltas.

No final do capítulo breves comentários são feitos sobre duas outras ferramentas: (i) filtros digitais IIR, como alternativa ao uso da transformada *wavelet*; (ii) transformação modal, a qual é usada para auxiliar a transformada *wavelet* no caso de sinais trifásicos acoplados.

3.2 Transformada Wavelet

3.2.1 Comentários Iniciais

“A partir da análise *wavelet* é possível ter a visualização tanto da floresta quanto de uma árvore” (Graps, 1995). Esta frase conduz a uma idéia inicial do poder da análise *wavelet*. Em outras palavras, é possível ter uma visão tanto global quanto localizada do que se deseja analisar.

A transformada *wavelet* surgiu da necessidade de análise do comportamento tempo-freqüência de sinais ou, como é mais comumente dito, tempo-escala, introduzindo melhorias em relação às técnicas baseadas na transformada de Fourier. As *wavelets* são o resultado de décadas de pesquisa na busca de funções mais apropriadas do que os senos e co-senos, para a análise de sinais.

Existe um grande leque de aplicações para esta técnica, dentre as quais destacam-se: compressão de dados; processamento de imagens e vozes; eliminação de ruídos de sinais; visão humana e computacional; detecção de similaridades; dentre outras.

De fato, em sua breve história dentro do campo de processamento de sinais, a teoria da transformada *wavelet* tem se mostrado uma importante adição à coleção de ferramentas de tratamento de sinais e cada vez mais vêm ganhando popularidade entre os pesquisadores de todo o mundo.

3.2.2 Evolução Histórica (Graps, 1995b)

A evolução histórica que levou ao desenvolvimento da análise *wavelet* começou no século dezenove com as teorias de análise em frequência devidas a Joseph Fourier. Os estudos de Fourier representaram um papel essencial na evolução das idéias matemáticas sobre funções.

Visando melhorar os resultados obtidos por Fourier, Denis Gabor em 1946, desenvolveu a transformada de Fourier de curto tempo (Oppenheim, 1989), que procurava adaptar a resposta da transformada de Fourier perante sinais não estacionários. Em paralelo a esse estudo foi desenvolvida uma outra técnica chamada de distribuição de Wigner-Ville (Cohen, 1989). Essas duas teorias são reconhecidas devido à sua versatilidade e seu rico conteúdo matemático.

A primeira menção da palavra *wavelet* foi encontrada no apêndice da tese de Alfred Haar, no ano de 1909 (Graps, 1995; Misiti, 2002). No entanto, o conceito de *wavelet* na abordagem teórica utilizada neste trabalho, foi proposto pela primeira vez por Alex Grossman e Jean Morlet no ano de 1980, em suas pesquisas no campo da física quântica.

O desenvolvimento dos métodos da análise *wavelet*, utilizados neste trabalho, se deve principalmente a Yves Meyer e sua equipe de pesquisadores. Destes métodos, o principal algoritmo é datado em 1988, realizado por Stephane Mallat.

Alguns anos depois, Ingrid Daubechies utilizou o trabalho de Stephane Mallat para desenvolver um conjunto de *wavelets* que provavelmente são as *wavelets* mais elegantes e mais utilizadas hoje em dia.

Os estudos no campo da análise *wavelet* vêm crescendo, mostrando que podem existir cada vez mais aplicações para esta valiosa técnica de tratamento de sinais.

3.2.3 Evolução Técnica

De acordo com o histórico apresentado, a evolução sucedeu-se de acordo com a necessidade de desenvolvimento de técnicas de tratamento de sinais cada vez mais apuradas para atenderem a diversidade cada vez maior de aplicações.

Desta maneira, para se analisar os aspectos técnicos que levaram a esta evolução, tem-se que retroceder aos trabalhos de Fourier, passando pela transformada de curto tempo, para finalmente chegar ao entendimento da transformada *wavelet*.

3.2.3.1 Transformada de Fourier

A análise de Fourier é provavelmente a mais conhecida e utilizada dentre as técnicas de tratamento de sinais existentes. Ela pode ser interpretada como uma técnica matemática para a transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência.

Matematicamente a Transformada de Fourier (FT) de um sinal contínuo no tempo $s(t)$ é dada pela equação (3.1).

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

A função $S(f)$ representa a função $s(t)$ no domínio da frequência, obtida por um somatório infinito de exponenciais complexas, como é possível observar pelos limites de integração ($-\infty$ a $+\infty$). Com relação ao resultado da operação matemática, pode-se observar que quando da transformação para o domínio da frequência, informações de tempo são perdidas. Conseqüentemente, olhando para os resultados da transformada de Fourier, é impossível dizer quando um evento particular ocorreu.

Para a implementação da transformada de Fourier em computador, bem como para tratamento de sinais amostrados, deve-se lançar mão da transformada discreta de Fourier, cuja definição matemática é dada pela equação (3.2).

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.2)$$

Para se demonstrar a fragilidade da análise de Fourier perante à sinais não estacionários, implementou-se a FT em um sinal exemplo. Esse sinal possui um componente fundamental de 60 [Hz] e um transitório amortecido na frequência de 1 kHz, conforme a Figura 3.1.

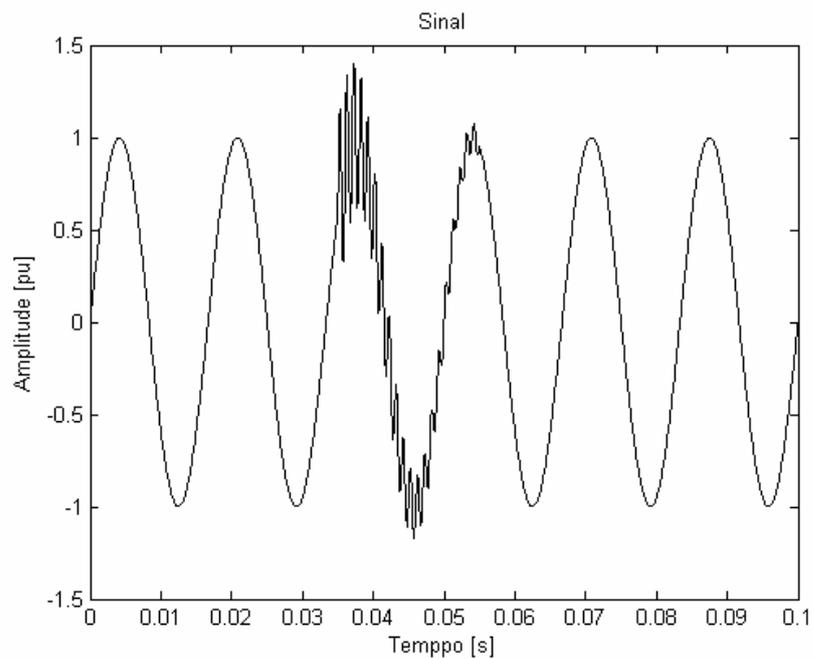


Figura 3.1 - Sinal de 60 Hz com transitório.

Aplicando-se, então, a transformada de Fourier para este sinal, tem-se como resultado o conteúdo espectral mostrado na Figura 3.2.

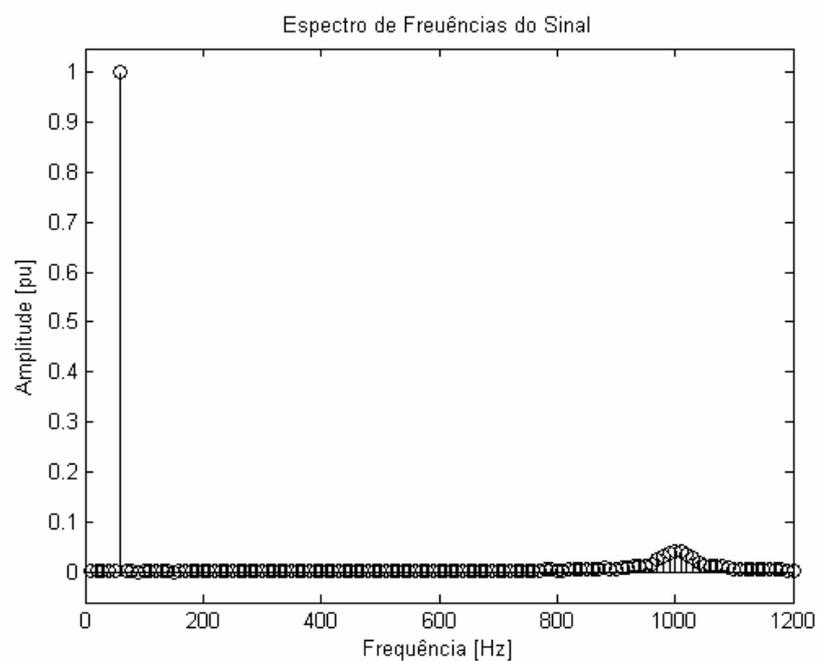


Figura 3.2 - Espectro de frequências do sinal.

Observa-se que existe um componente de amplitude 1 pu na frequência fundamental (60 Hz), bem como alterações no espectro por volta da frequência de 1 kHz. Analisando

apenas o espectro de frequência pode-se erroneamente concluir que o sinal é composto por um componente senoidal de 60 Hz em conjunto com outros componentes senoidais, por volta de 1 kHz, durante todo o intervalo de tempo.

Qualquer reconstrução do sinal original seria impossível sem a informação do tempo.

3.2.3.2 Transformada de Fourier de Curto Tempo

Na busca de soluções para minimizar a perda de informações temporais da transformada de Fourier, foram desenvolvidas algumas técnicas. Dentre elas, a mais conhecida e utilizada é a Transformada de Fourier de Curto Tempo (*Short-Time Fourier Transform* - STFT). Sua idéia fundamental é analisar apenas uma pequena seção do sinal a cada intervalo de tempo. Para isso, é definida uma função janela $\omega(t)$ a ser multiplicada pelo sinal no domínio do tempo. Desse modo, a transformada é definida de acordo com a expressão (3.3).

$$S(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\omega(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.3)$$

Para cada janela de tempo a transformada de Fourier é aplicada, obtendo-se resultados diferentes em cada intervalo. Um diagrama tempo-frequência irá retratar o resultado de tal transformação.

Observa-se então, que a STFT decompõe o sinal em uma função bidimensional de tempo e frequência.

Esta característica é ilustrada pela Figura 3.3.

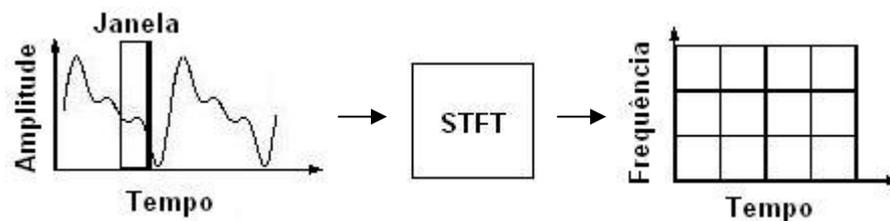


Figura 3.3 - Transformada de Fourier de curto tempo.

Com a STFT é possível obter uma relação de compromisso entre tempo e frequência, pois ela traz simultaneamente informações sobre quais frequências ocorreram em cada

intervalo de tempo. Todavia existe uma limitação de precisão que é determinada pelo tamanho da janela. De maneira prática, quanto menor a janela, mais precisas são as informações de tempo, porém mais imprecisas são as informações de frequência. Analogamente, quanto maior a janela, mais precisas são as informações de frequência, e menos as informações de tempo. Esse comportamento é compreendido pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg (Wickerhauser, 1994).

Outra desvantagem da STFT é que, uma vez escolhido o tamanho da janela, esse será o mesmo para todas as frequências, o que retrata a falta de flexibilidade. Tal comportamento é notado pelo tamanho fixo das regiões definidas pela janela no diagrama tempo-frequência da Figura 3.3.

3.2.3.3 Transformada *Wavelet*

O próximo passo lógico é a utilização de uma técnica capaz de trabalhar com janelas de tamanhos variáveis, definindo regiões variáveis no diagrama tempo-frequência, ou tempo-escala. Chega-se então à transformada *wavelet* (WT) (Daubechies, 1987), (Daubechies, 1990).

É possível definir regiões longas para obter informações em baixas frequências, ou definir regiões curtas para informações em altas frequências.

A técnica é melhor visualizada através da Figura 3.4.

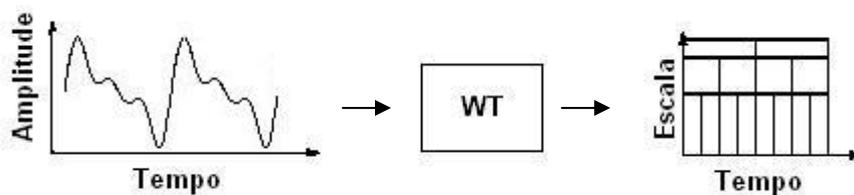


Figura 3.4 - Transformada *Wavelet*.

Observando a figura nota-se imediatamente a diferença entre os diagramas tempo-frequência da STFT e tempo-escala da WT. Para esse último as regiões definidas pelo tamanho das janelas de tempo são variáveis, enquanto na primeira as regiões são fixas. É possível mostrar que a relação entre frequência e escala é inversamente proporcional, podendo-se utilizar ambas as maneiras de representação. Todavia é mais comumente encontrada a representação por escala’.

Na análise *wavelet*, a escala utilizada para analisar um sinal representa um papel especial. Se “olharmos” para um sinal através de uma janela de tempo larga (grande escala), notaríamos características grosseiras, comportamento regido pelas baixas frequências. De forma análoga, se “olharmos” para um sinal através de uma pequena janela (pequena escala), notaríamos características mais sutis, comportamento regido pelas altas frequências.

Desta forma, a análise *wavelet* é capaz de revelar certos aspectos dos sinais que outras técnicas de análise não conseguem, como por exemplo, pequenas discontinuidades, impulsos ou transitórios de alta frequência, eventos típicos de sinais existentes em sistemas elétricos.

É interessante notar que tanto a FT quanto a WT são vistas como uma mudança de uma função para um diferente domínio. Porém para a FT, esse novo domínio tem como funções de base senos e co-senos. Já para a WT, o novo domínio contém funções de base que são um pouco mais complexas, chamadas de *wavelets* mãe.

Também é possível observar que a WT decompõe os sinais em componentes de frequência semelhantemente à FT, porém não uniformemente no domínio da frequência. A Figura 3.5 (Graps, 1995), ilustra tais comportamentos.

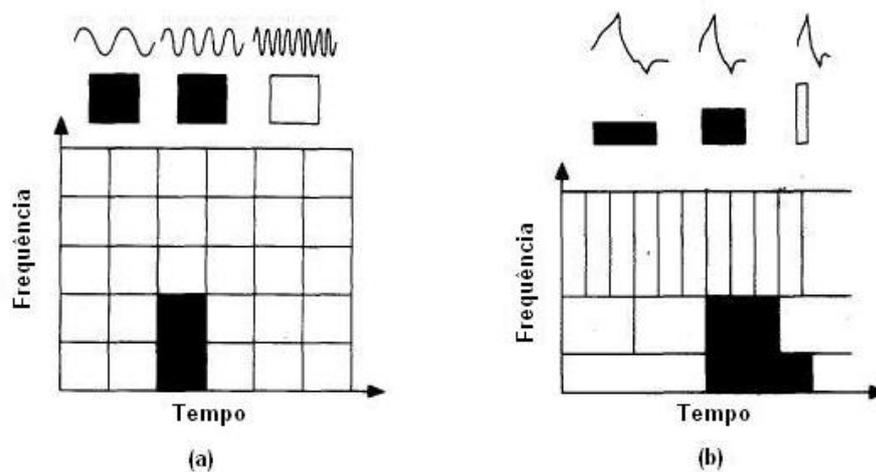


Figura 3.5 - Comparação entre STFT (a) e WT (b).

3.2.4 Transformada *Wavelet* Contínua

Define-se a transformada *wavelet* como sendo uma operação linear que decompõe o sinal em diferentes escalas e diferentes níveis de resolução, ou de maneira mais prática, como sendo a soma durante todo o tempo do sinal, multiplicado por versões escaladas e transladadas de uma função de base, a *wavelet* mãe.

Matematicamente, a transformada *wavelet* de um sinal contínuo $s(t)$ (CWT) é definida da forma apresentada pela expressão (3.4) (Burrus, 1998), (Bentley, 1994).

$$CWT_S^\psi(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi_{ab}^*(t)dt \quad (3.4)$$

onde $\psi_{ab}(t)$ são as versões escaladas e transladadas da *wavelet* mãe $\psi(t)$ fornecidas pela equação (3.5).

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.5)$$

Estas funções são denominadas de *wavelets* filhas, ou simplesmente *wavelets*. O parâmetro a é responsável pelo escalamento, o parâmetro b pela translação, e a divisão por \sqrt{a} visa manter a energia das *wavelets* filhas a mesma da *wavelet* mãe.

Como é notado de (3.4), a transformada *wavelet* depende do tipo de *wavelet* mãe escolhido. Existem vários tipos atualmente de *wavelet* mãe considerados, haja vista as poucas restrições para a determinação de uma *wavelet* mãe (oscilatória, média zero e rápido decaimento de ambos os lados). A título de exemplo, ilustra-se, através da Figura 3.6, as *wavelets* de Haar e Morlet.

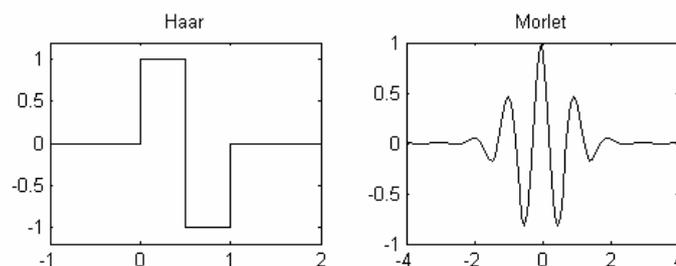


Figura 3.6 - Tipos de *wavelet* mãe.

O procedimento para se analisar um sinal pela CWT é encontrado em Misiti (2002).

3.2.5 Transformada Wavelet Discreta

Para o tratamento de um sinal discreto $s[k]$ é necessário realizar a “discretização” da transformada, a qual é conhecida por Transformada *Wavelet* Discreta (*Discrete Wavelet Transform* - DWT). O desenvolvimento dessa transformada é possível através da equação (3.6).

$$DWT_x^\psi [m, n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} s[k] \psi \left[\frac{k - a_0^m n b_0}{a_0^m} \right] \quad (3.6)$$

onde a_0^m é o parâmetro de escalamento e $n b_0$ é o parâmetro de translação. A resposta da DWT em função da variação desses dois parâmetros é representada pelo diagrama tempo-escala, com diferentes divisões no tempo e na frequência, ilustrada na Figura 3.7.

Como já mencionado, a DWT possui uma resolução melhor no tempo e pior na frequência para as mais baixas escalas, e o inverso para as escalas mais altas.

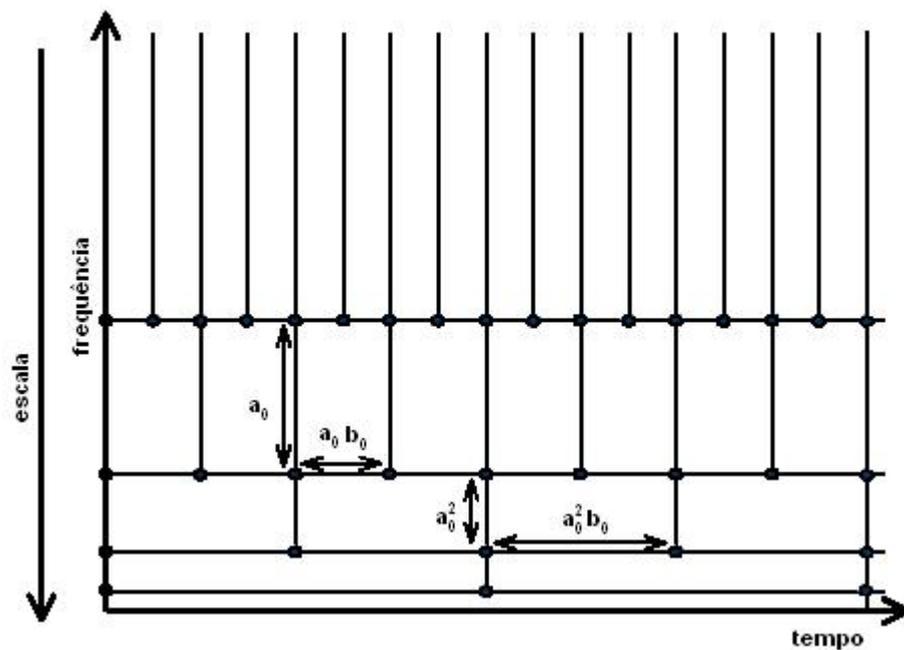


Figura 3.7 - Diagrama tempo-escala

Para um bom desempenho da DWT, deve-se escolher criteriosamente os valores de a_0 e b_0 . A mais simples e comum escolha é fazendo $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$. Nesse caso a transformada *wavelet* é chamada diádica-ortonormal. Diádica pela potenciação na base 2, e ortonormal pela formação de bases ortonormais de um espaço $L^2(\mathfrak{R})$ (funções de quadrado integráveis) pelas famílias de *wavelets* expandidas (Vetterli, 1992).

A utilização de bases ortonormais é de grande interesse, por vários motivos (Burrus, 1998; Daubechies, 1997; Vetterli, 1992). Dentre eles destaca-se a obtenção de um importante algoritmo conhecido como análise de decomposição multi-resolução ou simplesmente análise multi-resolução (AMR), cujo princípio é descritas a seguir.

3.2.5.1 Análise multi-resolução

A análise multi-resolução (AMR) trabalha dividindo o espectro do sinal em sub-bandas de frequência, para tratar cada sub-banda separadamente. Aplicando a AMR através da transformada *wavelet* (Burrus, 1998) é possível obter um compromisso entre as resoluções no tempo e na frequência, o que permite, dentre outros, uma eficiente extração de detalhes contidos nos sinais.

A base teórica da AMR parte da utilização de duas funções inter-relacionadas: uma função denominada “função escalamento” (3.7) e outra denominada “função *wavelet*” (3.8).

$$\phi(x) = \sum_n g(n)\sqrt{2}\phi(2x-n) , \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3.7)$$

$$\psi(x) = \sum_n (-1)^n g(-n+1)\sqrt{2}\phi(2x-n) , \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3.8)$$

A partir de tais funções é possível decompor qualquer sinal $f \in L^2(\mathfrak{R})$ em uma soma de n termos ponderados das funções *wavelet* e escalamento, de acordo com a expressão (3.9) (Burrus, 1998).

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k)\phi_k(x) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{-\infty} d_j(k)\psi_{j,k}(x) \quad (3.9)$$

onde os parâmetros $d_j(k)$ são os coeficientes *wavelet*, e $c(k)$ é o sinal no nível de mais baixa resolução.

Contudo, para maior eficiência computacional é possível trabalhar somente com coeficientes presentes na definição das funções *wavelet* e escalamento. Tais coeficientes compõem dois tipos de filtros: um passa-altas, denominado $h[n]$ e relacionado com a função *wavelet* e outro passa-baixas, denominado $g[n]$ e relacionado com a função escalamento. Como exemplo, as funções escalamento e *wavelet* de Haar dão origem aos seguintes filtros:

$$[g] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$[h] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Diversas outras *wavelets* podem ser encontradas na literatura (Burrus, 1998), incluindo as *wavelets* de Daubechies (1987).

Utilizando-se $g[n]$ e $h[n]$ torna-se possível a construção de uma estrutura de filtragem do tipo piramidal, conforme mostra a Figura 3.8. A frequência de amostragem utilizada neste exemplo é 16 kHz, a mesma do sinal da Figura 3.1.

Observa-se que, no primeiro nível de decomposição, o sinal de entrada é decomposto pelo filtro passa-baixa $g[n]$ e pelo filtro passa-alta $h[n]$. O resultado do primeiro é conhecido como tendência ou aproximação do sinal, já o resultado do segundo é conhecido como detalhe do sinal. No segundo nível de decomposição o sinal resultante do primeiro filtro $g[n]$ é decomposto em dois, da mesma forma que o sinal de entrada foi no primeiro nível. E assim ocorre sucessivamente.

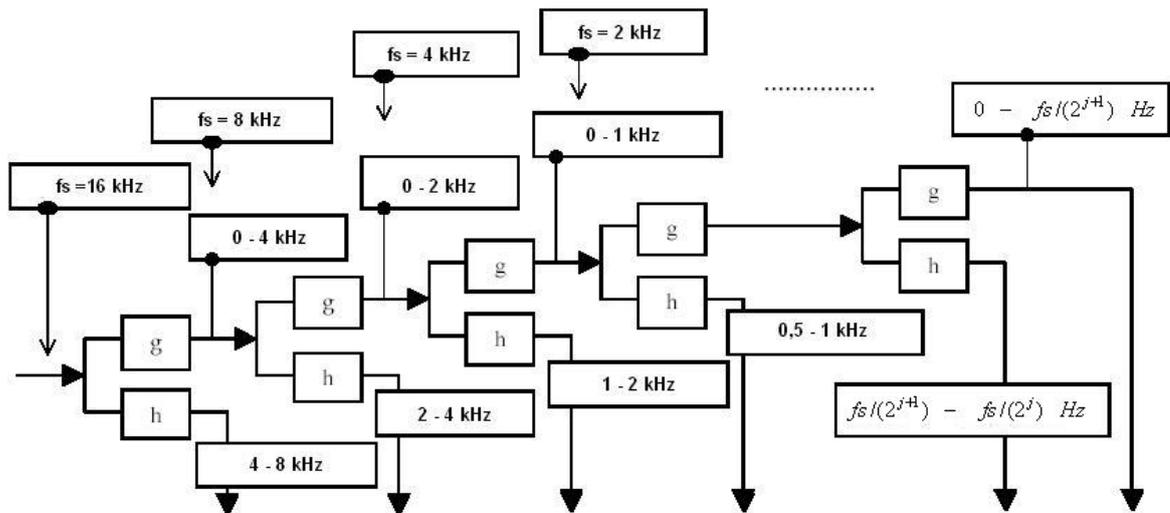


Figura 3.8 - Faixas de frequência da estrutura piramidal.

Deve-se observar que em cada nível de decomposição o número de amostras é a metade do nível anterior. Isso significa que a resolução em frequência aumenta e a resolução no tempo diminui.

Para uma melhor compreensão, um exemplo de análise multi-resolução é feito com o sinal da Figura 3.1. Vale lembrar que esse sinal é composto por um componente de 60 Hz e um transitório amortecido de frequência 1 kHz. Para esta análise foi utilizada a *wavelet* mãe Daubechies tipo 2 (db2) e a AMR realizada apenas até o 6º nível. Para esse nível tem-se apenas 25 amostras, ou seja, apenas 4,25 amostras por ciclo. Para níveis posteriores a análise fica prejudicada, haja vista a proximidade de violação do critério de amostragem mínima para sinais de 60 Hz (Nyquist, 1928). O resultado obtido a partir de tal análise é mostrado na Figura 3.9.

Nota-se que o transitório é capturado e detalhado até o terceiro nível de decomposição, para o qual a faixa de frequência é de 0 a 1 kHz. No próximo nível, de faixa 0 a 500 Hz, o transitório é totalmente filtrado. Tal característica da AMR é interessante para aplicações tais como as de localização de faltas.

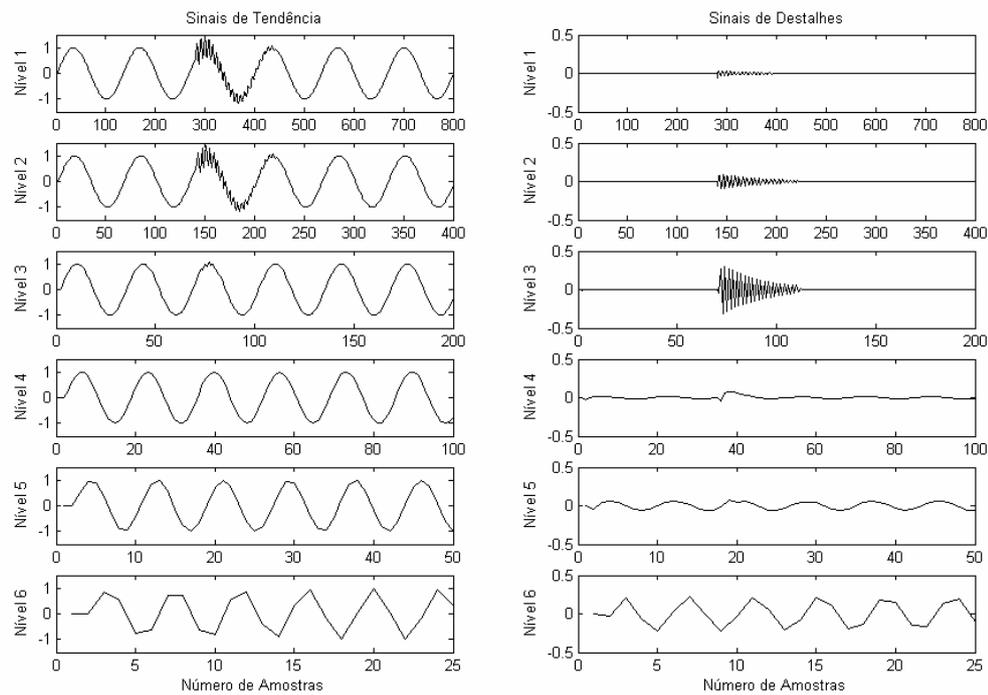


Figura 3.9 - Aplicação da AMR no sinal exemplo.

3.3 Outros Filtros Digitais

É sabido que a Transformada *Wavelet* não apresenta uma grande flexibilidade no que diz respeito às faixas de frequências de cada nível de decomposição, pois essas são definidas de acordo com a taxa de amostragem. Para certas aplicações torna-se desejável definir uma determinada faixa de frequência de acordo com as características de cada sinal.

Uma alternativa, para resolver esta questão, é a utilização da técnica de filtragem digital IIR (*Infinite Impulse Response*) que, apesar de não conseguir um tempo de resposta comparável ao da *wavelet*, possui maior flexibilidade quanto às frequências de filtragem.

3.3.1 Filtros IIR (*Infinite Impulse Response*)

Um filtro IIR é representado, por sua função de transferência dada por (3.11).

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i z^{-i}}{1 - \sum_{i=0}^n b_i z^{-i}} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}}{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - \dots - b_n z^{-n}} = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (3.11)$$

onde a e b são os coeficientes do filtro, $Y(z)$ é o sinal de saída e $X(z)$ é o sinal de entrada, ambos no domínio Z . A Figura 3.10 ilustra o diagrama esquemático de um filtro IIR.

Mais detalhes sobre os filtros IIR podem ser encontrados em White (2000).

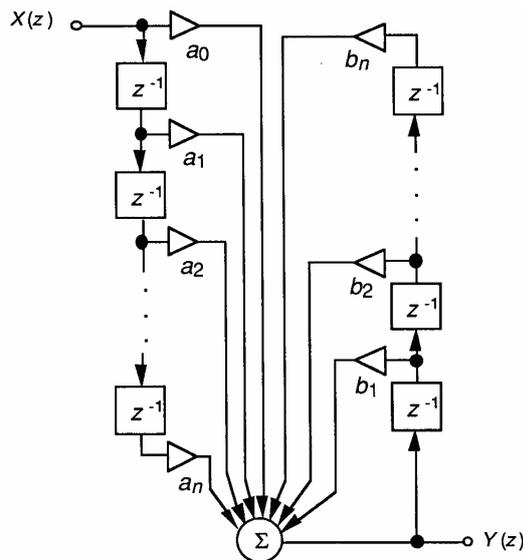


Figura 3.10 – Diagrama esquemático do filtro.

Quando da aplicação do algoritmo de localização de faltas em simulações computacionais, será testada a influência de diferentes técnicas de filtragem. Oportunamente a transformada *wavelet* será substituída por um filtro IIR e os resultados obtidos pelo algoritmo de localização de faltas serão comparados.

3.4 Transformação Modal

Sinais elétricos medidos em terminais de LTs polifásicas são mutuamente acoplados. Isso significa que eventos que geram transitórios eletromagnéticos (por exemplo, faltas) em uma das fases afetarão em maior ou menor grau as demais. Para eliminar esse problema, deve-se lançar mão de uma transformação matemática com a finalidade de desacoplar os sinais. A análise modal realiza tal tarefa, obtendo, no caso de um sistema trifásico, 3 modos independentes: o modo 0, também denominado de modo terra e os modos 1 e 2,

denominados de modos aéreos (Hedman, 1965). Nessa análise os componentes modais são obtidos a partir dos sinais de fase de acordo com a expressão (3.12).

$$v_{mod} = T v_f \quad (3.12)$$

onde T é uma matriz de transformação modal, v_f são os valores no domínio de fase e v_{mod} são os valores no domínio modal.

Existem diversas soluções para a matriz T , uma das mais usuais é dada pela transformada de Clarke, a qual é definida de acordo com a expressão (3.13).

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Em termos de ondas viajantes existem diferentes velocidades de propagação em um sistema trifásico. Nos modos aéreos as ondas se propagam com velocidade próxima à da luz. Já para o modo terra a velocidade de propagação é aproximadamente 70 % da velocidade da luz. Esses valores são dependentes dos parâmetros da LT.

É importante mencionar que para faltas com conexão ao terra (fase-terra, fase-fase-terra), existem sempre modos aéreos e terra, ao passo que para outros tipos de falta (fase-fase, trifásica) somente existirão modos de propagação aéreos.

A utilização da transformação modal é essencial para auxiliar a transformada *wavelet* na tarefa de localizar faltas, como será mostrado oportunamente.

3.5 Considerações Finais

Este capítulo teve por objetivo apresentar uma breve base teórica sobre a transformada *wavelet*, a qual será usada para enfatizar os instantes em que ondas viajantes refletem nos terminais da LT. Tal ferramenta matemática, com o auxílio da transformada modal, será então aplicada conforme apresentado nos capítulos subseqüentes.

Capítulo 4

Aplicação da Teoria das Ondas Viajantes na Localização de Faltas

*“Procure ser um homem de
valor em vez de ser um
homem de sucesso.”*

Albert Einstein

4.1 Considerações Iniciais

Como visto no Capítulo 2, existem várias metodologias para o cálculo de localização de falhas. Porém não é objetivo deste trabalho comparar tais técnicas, mas sim fazer uma aplicação da abordagem básica: o uso da decomposição *wavelet* para enfatizar as ondas viajantes e localizar a falta. Tal metodologia é então aplicada em falhas simuladas, variando-se as topologias da rede, as distâncias de falta, as resistências de falta, os ângulos de incidência de falta, dentre outros parâmetros.

Dentro da metodologia definida podem-se fazer alterações, tais como utilizar outros tipos de filtros digitais ao invés da transformada *wavelet*. Essa questão será abordada em seu devido momento.

A metodologia aqui aplicada utiliza os sinais de tensão do terminal da linha sob monitoração. O cálculo da distância da falta é realizado com base nos coeficientes *wavelet*, os quais são subsequentemente medidos, indicando os instantes de chegada das primeiras ondas viajantes. Para situar a aplicação pretendida, este capítulo será iniciado com algumas rápidas ponderações sobre as ondas viajantes, bem como o tipo de falta avaliado, a falta fase-terra.

4.2 Teoria das Ondas Viajantes

As ondas viajantes representam nada mais do que a propagação de energia elétrica em uma LT (Fuchs, 1973). Quando da ocorrência de um curto-circuito (falta), as consequentes mudanças na energia armazenada produzem ondas viajantes. Essas ondas viajam do ponto de falta, em ambos sentidos, até os terminais da LT. Quando a onda encontra uma descontinuidade de impedância (fontes, transformadores, etc.) ela é refletida e retorna ao ponto de defeito, onde ocorre uma nova reflexão e assim sucessivamente até desaparecerem devido à atenuação (Bhunja, 2002).

4.2.1 Velocidade de propagação

As ondas viajantes se propagam no sistema elétrico com uma velocidade definida pelos parâmetros da LT. As velocidades das ondas viajantes são comumente definidas pela equação (4.1).

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}} \quad (4.1)$$

onde m indica o modo de propagação, L e C são, respectivamente, os valores de indutância e capacitância por unidade de comprimento da LT. A expressão (4.1) é uma aproximação para a determinação da velocidade de propagação. Um modelo mais preciso utiliza as expressões completas, somente desconsiderando os efeitos das condutâncias, conforme expressão (4.2), de acordo com Fuchs (1973).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega}{\operatorname{Im}\left(\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)} \cdot j\omega C_0\right)} \\ \frac{\omega}{\operatorname{Im}\left(\sqrt{(R_1 + j\omega L_1)} \cdot j\omega C_1\right)} \\ \frac{\omega}{\operatorname{Im}\left(\sqrt{(R_2 + j\omega L_2)} \cdot j\omega C_2\right)} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Cabe aqui enfatizar que quando a falta envolve o terra é necessário ser ter cautela na determinação da velocidade v_0 , visto que os parâmetros L_0 e C_0 são, na prática, de difícil determinação.

4.2.2 Diagrama de Lattice

Uma ferramenta essencial e bastante didática para analisar a propagação das ondas viajantes é o diagrama de Lattice. Dois tipos de falta são apresentados a seguir.

4.2.2.1 Falhas Não Envolvendo o Terra

Seja inicialmente uma falta sem envolver o terra a uma distância d do terminal A, conforme a Figura 4.1

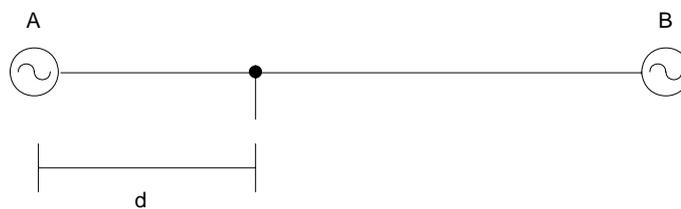


Figura 4.1 – Falta em uma LT.

O diagrama de Lattice representa as reflexões e os instantes de falta, como mostra a Figura 4.2.

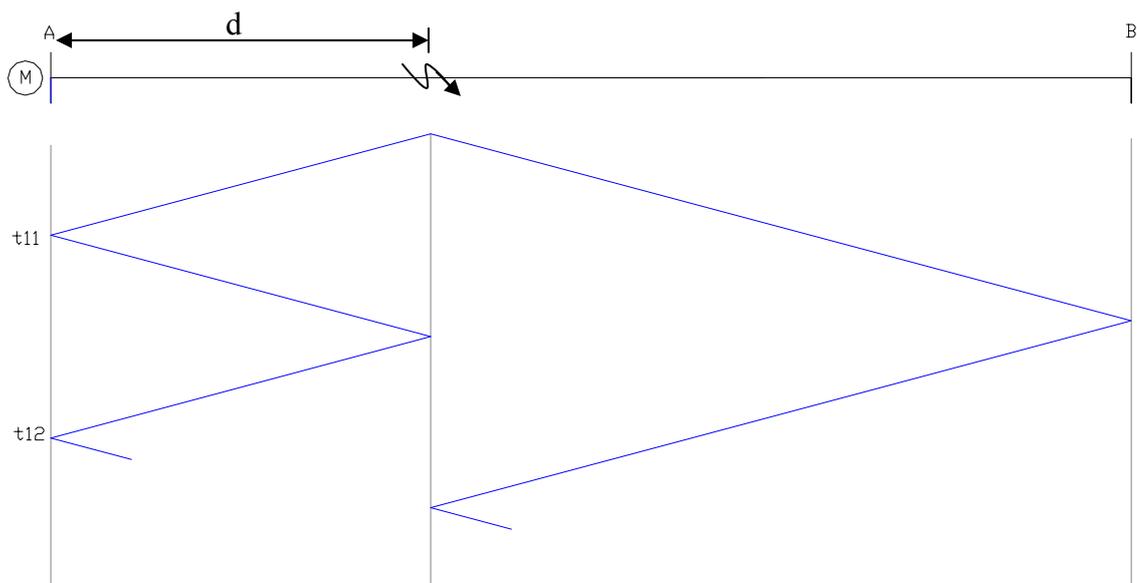


Figura 4.2 – Diagrama de Lattice para falhas fase.

onde M indica o local de medição.

Para estes tipos de falta as propagações se dão apenas no modo aéreo e as ondas refratadas podem ser desprezadas.

4.2.2.2 Falhas Fase-Terra

É sabido que aproximadamente 70% das falhas que ocorrem em sistemas elétricos são do tipo fase-terra. Esse fato remete a uma consideração especial para este tipo de falta, pois, sendo a que mais ocorre, é de grande interesse localizá-las com exatidão.

Por outro lado, as falhas fase-terra são as mais complexas para o processo de localização. O diagrama de Lattice (Figura 4.3) ilustra esse tipo de ocorrência.

Neste caso existirão diferentes modos de propagação, aéreo e terra, representados pelos traços em azul e verde, respectivamente. Deve-se enfatizar que as refrações, para este tipo de falta não podem ser desprezadas. No diagrama elas são representadas pelos traços em vermelho. Observa-se, naturalmente, que a onda no modo aéreo chega ao terminal antes da onda no modo terra.

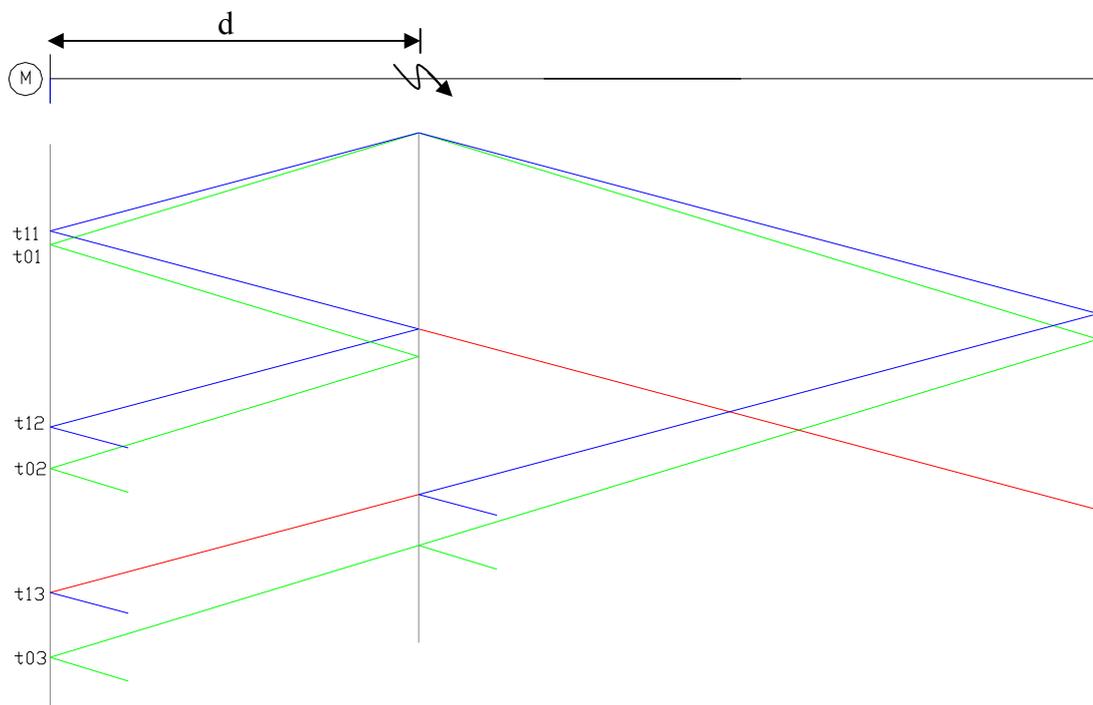


Figura 4.3 – Diagrama de Lattice para falhas fase-terra

A Figura 4.4 mostra um exemplo de sinais de tensão das três fases, sendo a fase A (azul) submetida à falta fase-terra.

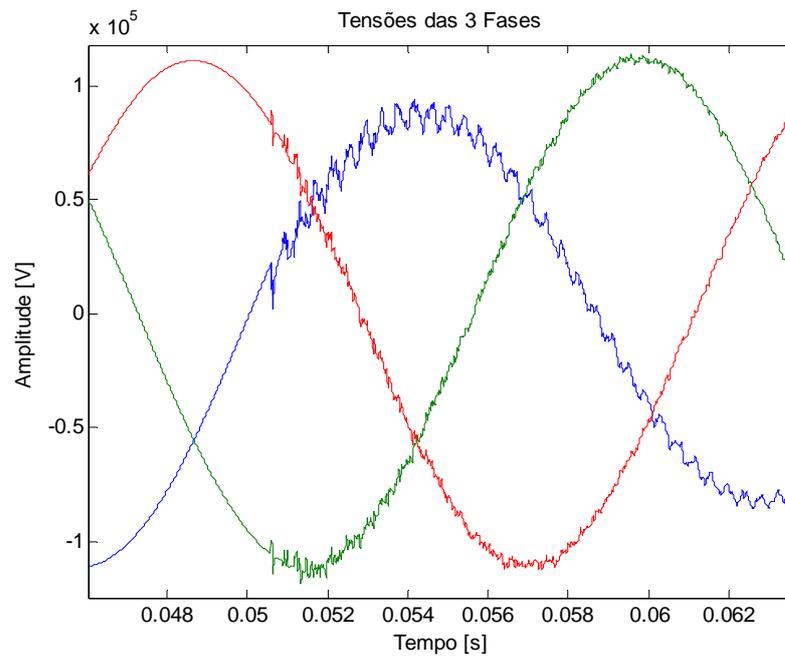


Figura 4.4 – Sinais de tensão

Observa-se que a perturbação ocorrida na fase A (azul) irá influenciar os sinais de tensão das fases B (verde) e C (vermelha), embora esses não estejam envolvidos no distúrbio. Uma visualização aproximada dos sinais de tensão auxilia a observação desse comportamento, conforme ilustra a Figura 4.5.

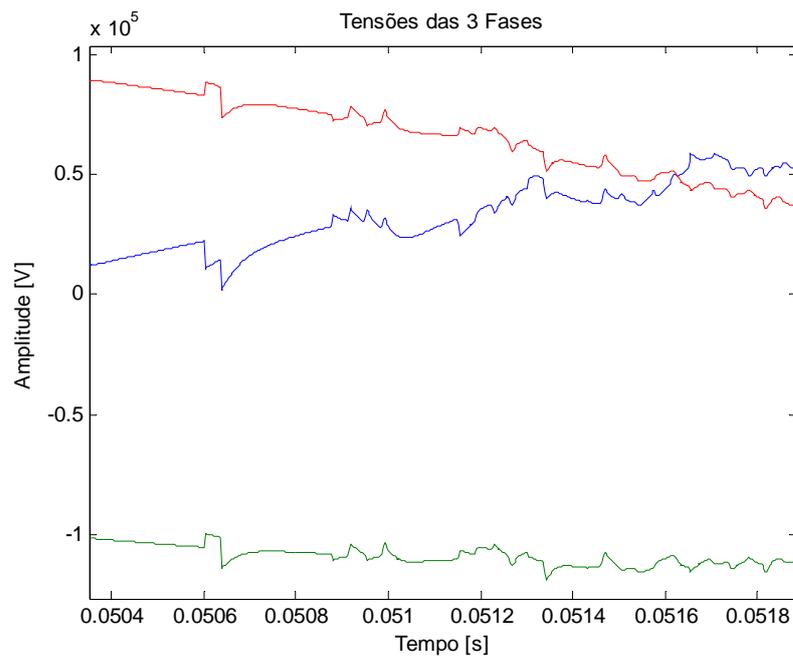


Figura 4.5 – Visualização aproximada dos sinais de tensão

Para a aplicação correta da teoria das ondas viajantes na localização de falhas fase-terra é necessário submeter os sinais de tensão a duas etapas diferentes, conforme já mencionado: transformação modal e transformada *wavelet*. A primeira etapa efetua o desacoplamento dos sinais no domínio de fase em modos aéreos e terra, conforme ilustrado pela Figura 4.6.

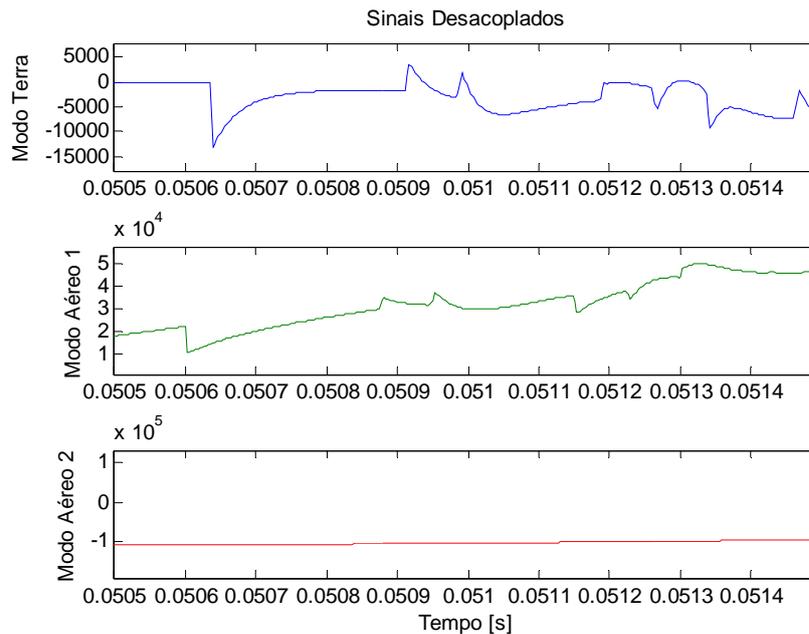


Figura 4.6 – Sinais desacoplados.

A segunda etapa tem por objetivo identificar os instantes de reflexão das ondas viajantes. Para tanto é aplicada a transformada *wavelet* via AMR (banco de filtros). O exemplo em questão é utiliza a *wavelet* Daubechies tipo 2 (db2). Enfatiza-se que foi considerado esse mesmo tipo de *wavelet* no decorrer de todo o trabalho. Para ilustrar a ação desta etapa de processamento, a Figura 4.7 mostra os coeficientes *wavelet* para os sinais no modo terra e no modo aéreo 1.

Visando destacar a identificação dos coeficientes *wavelet*, esses são elevados ao quadrado. A Figura 4.8 ilustra tal procedimento.

A partir destes sinais definem-se os instantes de tempo de reflexões das ondas viajantes, tanto no modo aéreo quanto no modo terra.

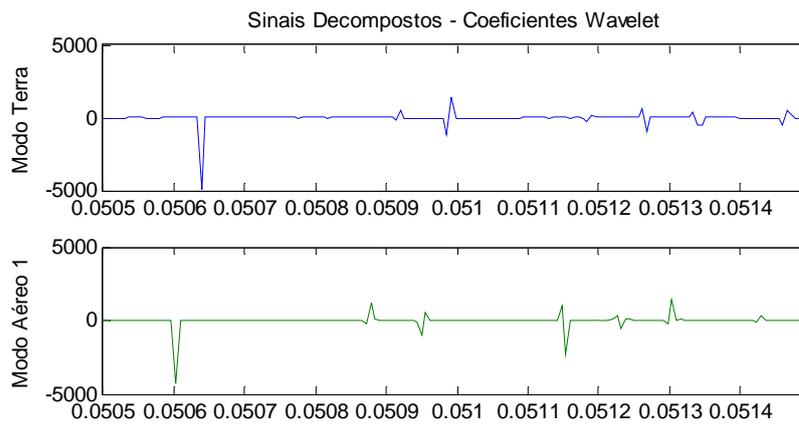


Figura 4.7 – Coeficientes *wavelet*.

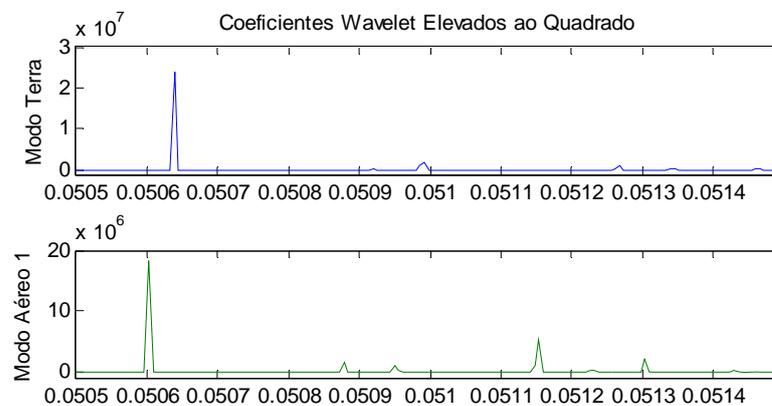


Figura 4.8 – Coeficientes *wavelet* ao quadrado.

4.3 Modelagem dos Sistemas Elétricos Estudados

Para comprovar a eficácia da sistemática de localização de faltas pode-se lançar mão de simulações computacionais. Para tanto, é necessário considerar uma modelagem dos sistemas elétricos a serem simulados.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram modelados diferentes tipos de sistemas, sofrendo alterações na topologia e nos parâmetros das LTs, além das alterações com respeito às ocorrências de faltas.

Duas topologias de LTs foram estudadas e modeladas: LTs com dois terminais; e LTs com três terminais.

4.3.1 LTs com Dois Terminais

A Figura 4.9 mostra o diagrama de blocos de uma LT com dois terminais, cujo modelo foi implementado em Matlab.

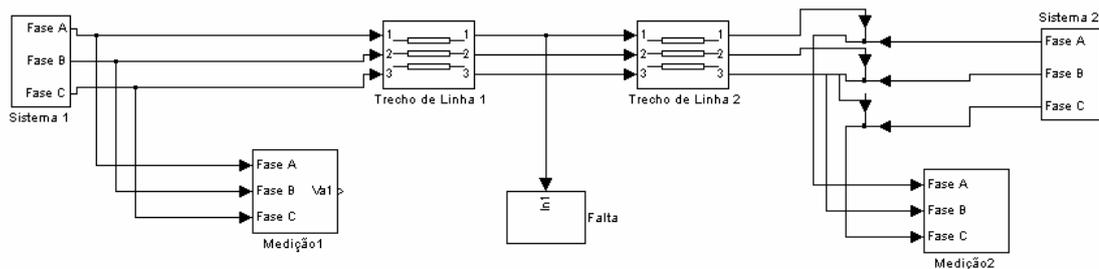


Figura 4.9 – Diagrama de blocos no Matlab.

A título de curiosidade, o mesmo diagrama de blocos implementado no ATPDraw é mostrada na Figura 4.10.

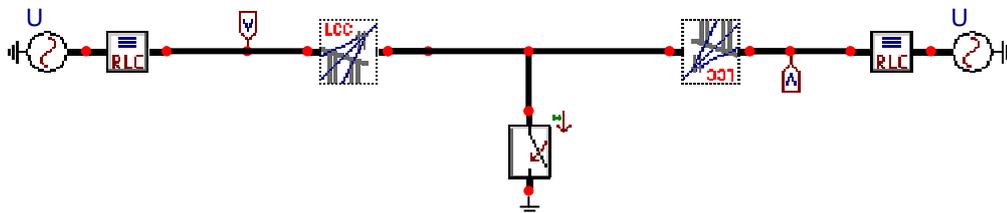


Figura 4.10 - Diagrama de blocos no ATP.

Toda modelagem constitui basicamente de três partes: fontes, LTs e faltas. Os itens subsequentes tratam de cada uma dessas três partes.

4.3.1.1 Fontes

O diagrama do modelo das fontes é mostrado na Figura 4.11.

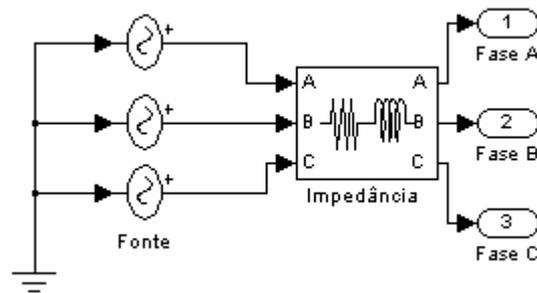


Figura 4.11 – Diagrama de Fonte.

Tendo como referência um sistema elétrico real, o valor eficaz de tensão entre fases adotado foi de 138 kV. Os valores de suas impedâncias são definidos de acordo com a potência de curto-circuito para o respectivo nível de tensão. Adotou-se como referência a potência de 1500 MVA. O cálculo das partes ativa e reativa da impedância das fontes é descrito a seguir:

$$Z_{cc} = \frac{V_N^2}{S_{cc}} = \frac{138^2}{1500} = 12,696 \, \Omega$$

Ainda com base em sistemas reais, utilizando valores típicos, pode-se adotar uma relação de $\frac{X}{R} = 11,635$, o que implica nos seguintes resultados para a resistência e para a reatância, por fase, das fontes:

$$R = 1,08867 \, \Omega$$

$$X = 12,6672 \, \Omega$$

4.3.1.2 Linhas de Transmissão

Os cálculos dos parâmetros para a modelagem das LTs são obtidos pelo *software* CELINTRA (Pires, 1989). Esse programa retorna entre outros parâmetros, as resistências, indutâncias e capacitâncias de seqüência da LT. Tais parâmetros são de fundamental importância para a modelagem computacional do sistema elétrico.

Para a determinação destes parâmetros é necessário definir os valores práticos da constituição de uma LT. No caso, uma das linhas modeladas para este trabalho apresenta os dados reais apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados reais da LT

Dados da LT	Fase A	Fase B	Fase C
Altura da estrutura [m]	18,55	18,55	18,55
Distância horizontal dos condutores com relação ao eixo de referência [m]	-2,5	0	2,5
Número de condutores por fase	1	1	1
Distâncias entre condutores de uma mesma fase [m]	0	0	0
Flecha para o vão típico [m]	5,36	5,36	5,36
Resistividade do solo [Ω .m]	1000	1000	1000
Resistência a 25 °C [Ω]	0,21752	0,21752	0,21752
Raio externo do condutor [cm]	0,8142	0,8142	0,8142
Raio médio geométrico [cm]	0,661	0,661	0,661
Raio do filamento da última camada [cm]	0,1285	0,1285	0,1285
Número de filamentos de uma camada	16	16	16

Além disto, para esta primeira situação de modelagem, a LT foi considerada perfeitamente transposta. Em uma LT perfeitamente transposta o desacoplamento é perfeito e as velocidades de propagação dos modos aéreos 1 e 2 são iguais. O comprimento da referida LT é de 120 km.

Finalmente, os resultados retornados pelo *software* CELINTRA para os parâmetros da LT são:

- $R_0 = 0,58449 \Omega$
- $R_1 = 0,256184 \Omega$
- $L_0 = 3,713 \text{ mH}$

- $L_1 = 1,304$ mH
- $C_0 = 5,176$ nF
- $C_1 = 9,086$ nF
- $v_1 = v_2 = 281670$ km/s
- $v_0 = 223481$ km/s

4.3.1.3 Faltas

O diagrama da falta é bem simples, como é pode ser observado na Figura 4.12.

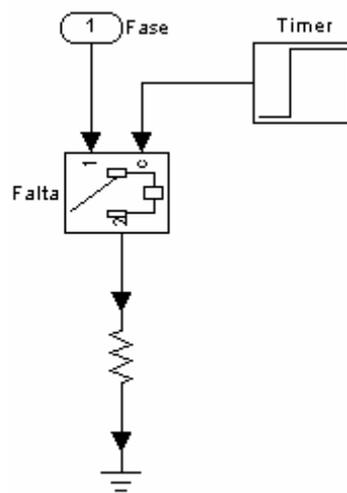


Figura 4.12 – Diagrama de Falta.

Trata-se de um chaveamento controlado, sobre uma resistência de falta R_f , a qual é variada da maneira desejada, ou seja, é possível simular a ocorrência de faltas com qualquer valor de resistência. O controle do tempo de chaveamento é importante, pois através dele é possível variar o ângulo de incidência de falta.

A falta ilustrada pela Figura 4.12 é do tipo fase-terra; no entanto, é possível, através de mínimas variações alterar o tipo da falta para fase-fase-terra, fase-fase ou trifásica. Esta mudança pode ser realizada de acordo com a necessidade de cada simulação.

4.3.2 LTs com Três Terminais

Durante o desenvolvimento deste trabalho, teve-se por objetivo também variar as características das LTs e a topologia da rede elétrica estudada com ênfase na LT de três terminais. Como exemplo, a Figura 4.13 mostra um sistema de três terminais utilizado para as simulações.

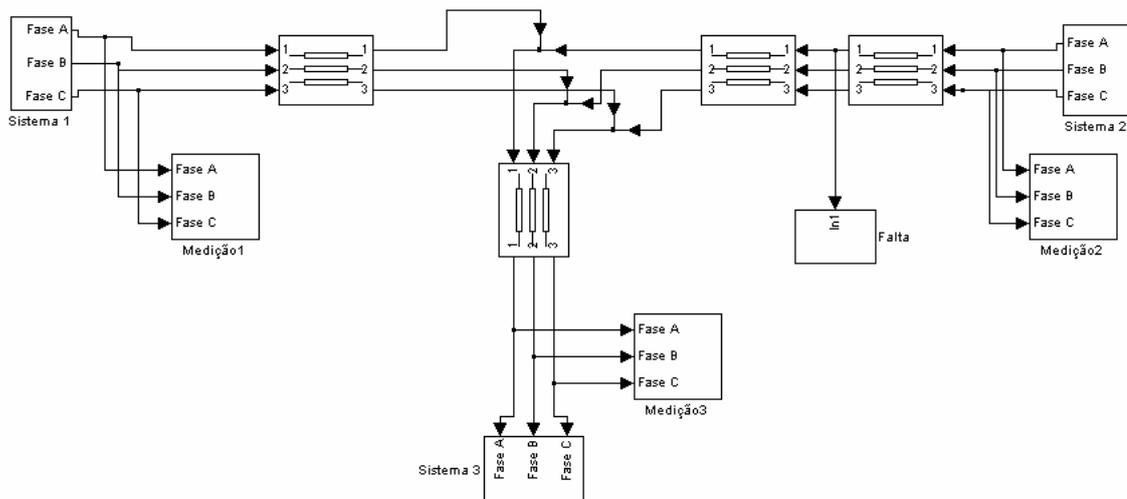


Figura 4.13 – Diagrama correspondente ao Circuito T.

A parametrização das fontes, LTs e faltas para linhas em “T” é análoga à parametrização apresentada para as LTs com dois terminais.

4.4 Algoritmo de Localização de Falhas Fase-Terra em LTs de Dois Terminais

4.4.1 Localização de Falhas em LTs com Dois Terminais

Toda a localização de falta fase-terra, em princípio, é feita com base nas velocidades de propagação dos modos aéreos. Por tal motivo, a transformação modal é essencial para separar os modos de propagação. Baseado nessa abordagem é que os diagramas de Lattice apresentam diferentes trajetos representando os modos de propagação 0 e 1.

4.4.1.1 Localização de Falhas na Primeira Metade da LT

A situação na qual uma falta ocorre na primeira metade da LT é a configuração mais simples para a determinação de sua distância, pois as duas primeiras reflexões de modo aéreo medidas no terminal já indicam imediatamente os instantes corretos para o cálculo da localização de falta.

O diagrama da Figura 4.14 ilustra tal situação.

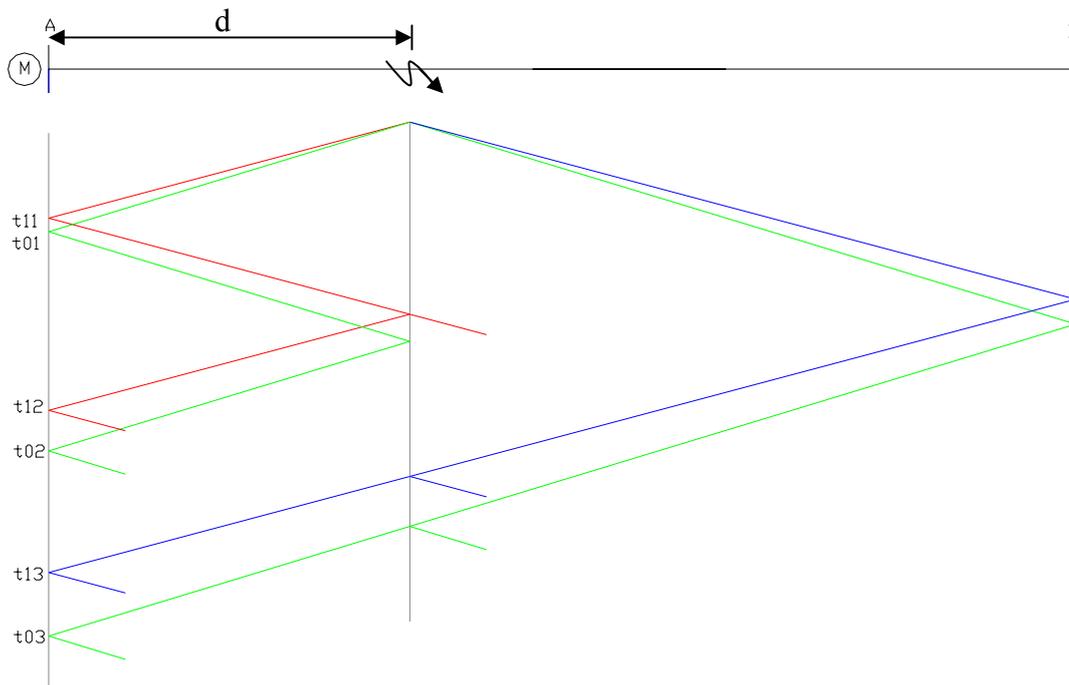


Figura 4.14 – Diagrama de Lattice para falhas na primeira metade da LT.

Observa-se, nesta situação, que a partir do ponto de falta ondas de tensão se propagam em ambos os sentidos; a onda representada pelo traço em vermelho chega ao terminal A no tempo igual a t_{11} e é refletida novamente para o ponto de falta. Ao chegar no ponto de falta, parte da energia da onda é refletida e parte é refratada. A parte refletida chega novamente ao terminal A no tempo igual a t_{12} . O tempo t_{13} é o instante de chegada da onda refletida ao terminal oposto B e que refratou no ponto de falta. A onda viajante representada pelo traço em verde é a de propagação terra. De posse do intervalo de tempo entre duas reflexões de interesse, a distância da falta é encontrada com base na velocidade do modo de propagação.

É necessário ter cautela com a identificação dos tempos de chegada de cada onda viajante, principalmente nas falhas que envolvem o terra, pois as ondas refratadas no ponto

de falta também vão incidir sobre as mesmas barras, conforme já mostrado. Para a situação na qual a falta ocorre na primeira metade da linha a localização da falta é definida em função das duas reflexões da onda viajante de modo aéreo, de acordo com a expressão (4.3)

$$d = \frac{v_1 (t_{12} - t_{11})}{2} \tag{4.3}$$

4.4.1.2 Localização de Falhas na Segunda Metade da LT

Quando uma falta fase-terra ocorre na segunda metade da LT, é necessário atenção na determinação dos instantes de reflexão, pois, como pode ser observado pelo diagrama de *Lattice* da Figura 4.15, a primeira onda refratada chega antes da segunda onda refletida.

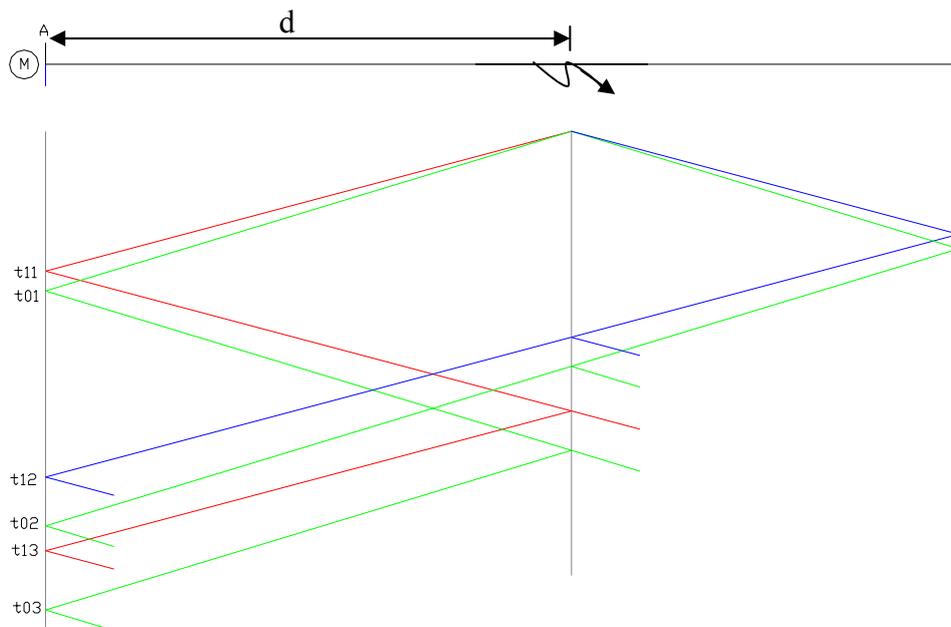


Figura 4.15 – Diagrama de Lattice para falhas na segunda metade da LT.

Como base neste resultado, identifica-se uma relação para o tempo t_{11} e outra para o tempo t_{12} , como indicado pelas expressões (4.4) e (4.5).

$$d = vt_{11} \tag{4.4}$$

$$l + (l - d) = vt_{12} \tag{4.5}$$

Conseqüentemente, para se determinar o local de falta deve-se agora substituir (4.5) em (4.4) para obter a expressão (4.6).

$$d = l - \frac{v(t_{12} - t_{11})}{2} \quad (4.6)$$

4.4.1.3 Cálculo da Distância Preliminar

Por sua vez, pode-se lançar mão de um método alternativo que calcula a distância de uma falta, conforme (Silveira, 2001). Esse método se baseia no intervalo de tempo entre a primeira reflexão da onda viajante no modo aéreo e a primeira reflexão da onda viajante no modo terra. As equações (4.7) e (4.8) mostram como calcular a distância de falta a partir da velocidade de modo aéreo e de modo terra.

$$d = v_1 t_1 \quad (4.7)$$

$$d = v_0 t_0 \quad (4.8)$$

Desenvolvendo (4.7) e (4.8), chega-se a uma expressão final para a distância d , de acordo com a expressão (4.9).

$$d = \frac{v_1 v_0}{v_1 - v_0} \Delta t \quad (4.9)$$

onde Δt é o intervalo de tempo $t_0 - t_1$.

Este valor de d é denominado neste trabalho distância preliminar, d_{pre} .

O cálculo da distância preliminar apresenta alguns problemas a saber: (a) na prática é difícil saber a exata velocidade do modo 0, uma vez que os parâmetros de seqüência zero variam dependendo do clima, do solo, etc; (b) para faltas muito próximas este intervalo (Δt) é muito pequeno e dependente de taxas de amostragem mais elevadas. Apesar de tais limitações, essa abordagem tem sido de fundamental importância para os métodos propostos de identificação da ocorrência da falta; se na primeira ou na segunda metade da linha.

4.4.2 Funcionamento

Com o objetivo de automatizar o procedimento de localização de falhas, foi desenvolvido um algoritmo computacional através do software Matlab. Esse algoritmo tem como dados de entrada os sinais de tensão, provenientes de simulações feitas tanto pelo próprio Matlab, através do módulo Simulink, quanto pelo ATP. Seu funcionamento bem como sua aplicabilidade e eficácia são descritos a seguir.

De posse dos sinais de tensão provenientes da simulação, o algoritmo realiza as operações da transformação modal, para desacoplar os sinais em modos aéreos e terra, e da transformada *wavelet*, para extrair apenas as variações abruptas (alta frequência) do sinal. O objetivo aqui é encontrar com precisão os instantes de reflexão das ondas viajantes. Para tanto, o primeiro passo é a definição de um limiar inicial. Tal limiar é definido como sendo 1 % do valor de amplitude do pico da primeira reflexão (modos aéreos e terra) encontrada no sinal decomposto. O valor de tal limiar é definido com base na atenuação esperada da onda viajante ao percorrer o comprimento total da LT.

Tendo definido o limiar, o algoritmo encontra, no sinal decomposto pela *wavelet*, as amostras nas quais as duas primeiras frentes de onda ultrapassaram a amplitude do sinal. Uma vez identificado que o limiar foi ultrapassado, o algoritmo encontra as amostras relativas aos picos de reflexão. De posse das amostras dos dois picos de reflexão no modo aéreo, o algoritmo faz uma avaliação dos dados, calculando uma distância de averiguação (d_{av}). Se essa distância (d_{av}) for maior que a metade do comprimento da LT (ou se não ocorrer a identificação das duas amostras), existe um indicativo de que houve um erro na obtenção da segunda e correta frente de onda. Nesse caso o limiar definido é maior do que deveria ser. O algoritmo passa então para uma sub-rotina de diminuição do limiar até que seja calculado um valor de distância prévia menor ou igual à metade da linha ou até que se atinja um valor mínimo pré-definido para o limiar.

A Figura 4.16 ilustra o procedimento de definição do limiar até que a amostra da segunda reflexão da onda viajante (modo aéreo) seja determinada.

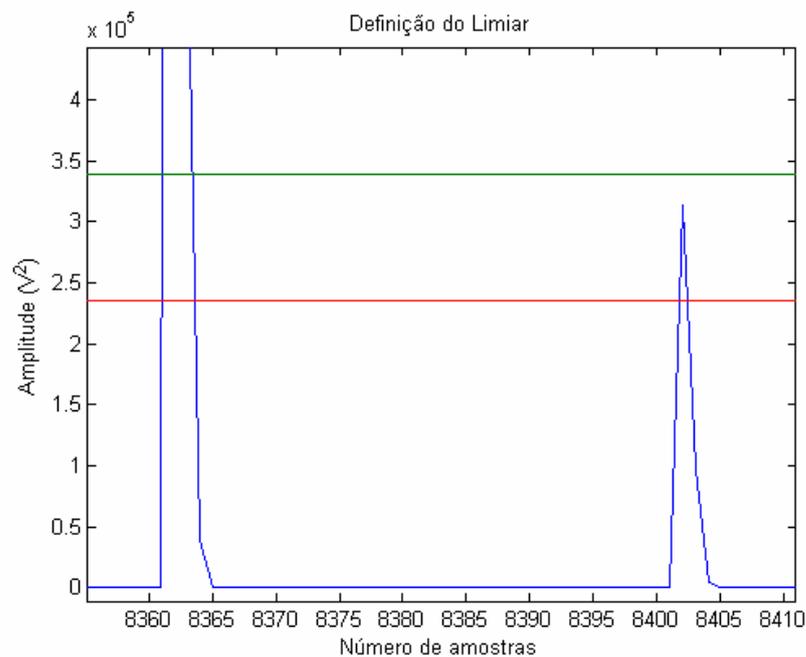


Figura 4.16 – Definição do limiar.

Deve-se observar que o algoritmo inicialmente define um limiar, ilustrado pela cor verde (Figura 4.16), porém, no exemplo da figura, este não encontra a segunda reflexão da onda viajante. Assim sendo, passa-se para a sub-rotina de diminuição de limiar até encontrar a segunda reflexão. O limiar correto é então ilustrado pelo traço em vermelho.

Com a determinação correta dos instantes das reflexões no modo aéreo é feito o cálculo da distância preliminar, conforme (4.9), a qual é definida pelo intervalo de tempo entre a primeira reflexão do modo aéreo e a primeira reflexão do modo terra, como discutido na Seção 4.4.1.3.

Se a distância preliminar assumir um valor menor ou igual à metade da LT adicionada a uma margem de segurança de 5 % de seu valor, definida experimentalmente, isso significa que a falta está na primeira metade da LT. Caso contrário, a falta está na segunda metade.

Uma vez feita a identificação da região em que se localiza a falta, resta apenas aplicar a fórmula correta para faltas na primeira e na segunda metade da linha, como discutido nas seções 4.4.1.1 e 4.4.1.2.

Para um melhor entendimento, a Figura 4.17 ilustra o fluxograma do algoritmo de localização de faltas desenvolvido.

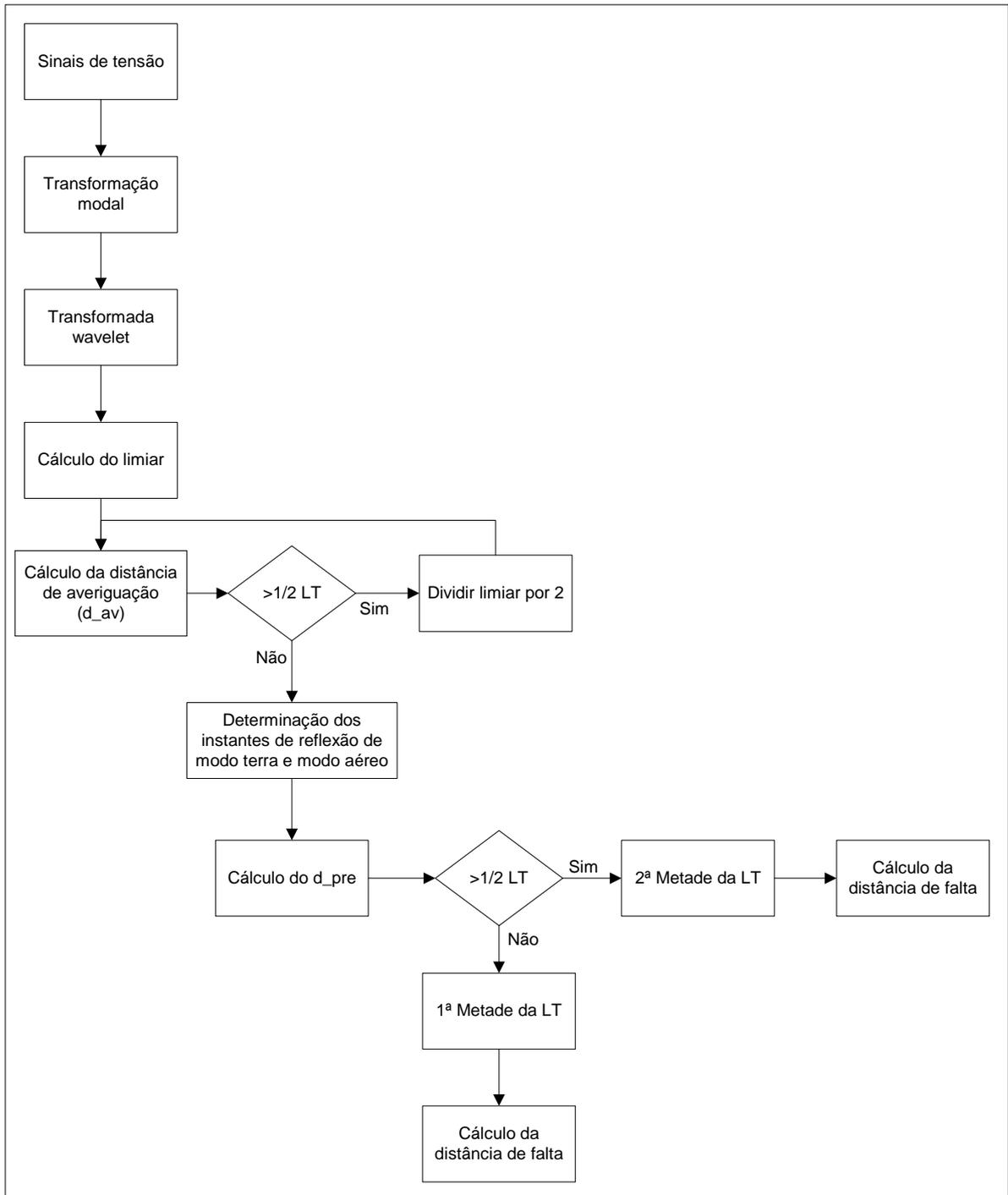


Figura 4.17 – Fluxograma do algoritmo de localização de falhas.

O algoritmo permite também simular a influência da variação de diversos fatores na precisão da localização de falhas, tais como resistência, ângulo de incidência, distância de falta, razão sinal ruído da tensão de entrada, taxa de amostragem, dentre outros.

4.5 Considerações Finais

O algoritmo de localização de falhas foi concebido para falhas do tipo fase-terra. Porém ele pode facilmente ser estendido para qualquer tipo de falta, mediante pequenas alterações no código fonte. Também pode ser aplicado a sistemas com dois ou três terminais, como será discutido no Capítulo 5.

Esta abordagem inicial ou (método aplicado a LT com dois terminais) será avaliado mediante um conjunto de simulações e seus resultados apresentados e discutidos no Capítulo 6.

Capítulo 5

Métodos Propostos

*“A satisfação está no esforço feito
para alcançar o objetivo, e
não em tê-lo alcançado.”*

Mohandas Karamchand Gandhi

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo tem-se por objetivo apresentar e descrever os métodos propostos para a localização de faltas em sistemas de transmissão com três terminais, também denominados “Circuitos T”. Um sistema elétrico de uma LT com três terminais típico está ilustrado na Figura 5.1.

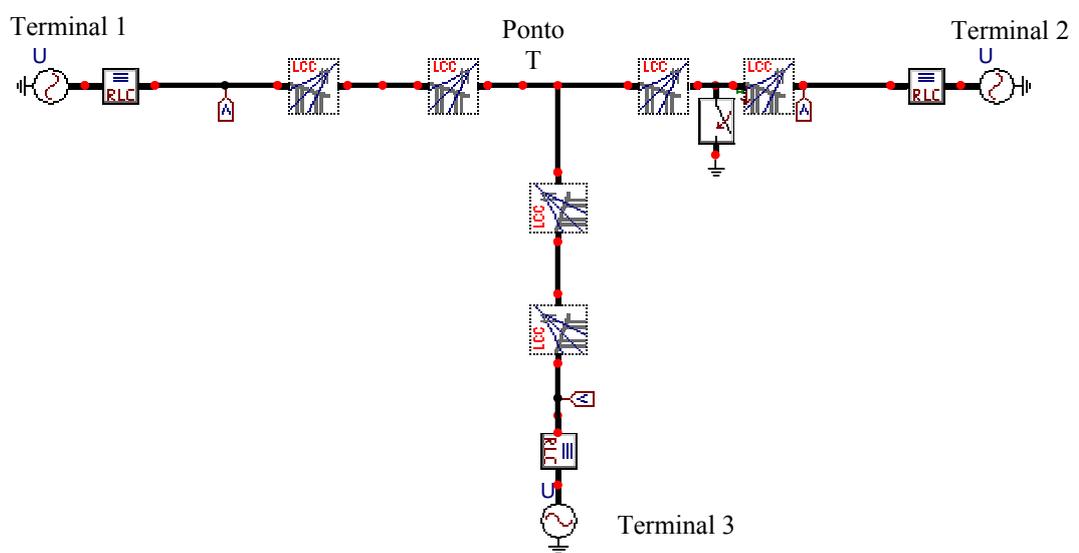


Figura 5.1 – Diagrama de simulação (ATP) de LT com três terminais.

A linha é modelada considerando a medição dos sinais nos três terminais conforme indicado pelos símbolos na Figura 5.1.

Assim sendo, inicialmente serão feitas algumas considerações sobre o método baseado em medições em todos os terminais, o qual conforme já mencionado tem sido denominado de método existente.

Em seguida, serão apresentados dois métodos, alternativos ao método existente, para o problema de localização de faltas em circuitos T. O primeiro método utiliza os registros de tensão de dois terminais do sistema elétrico, já o segundo, de apenas um terminal.

Primeiramente, é definida uma nomenclatura e a lógica de referências das distâncias de ocorrência das faltas. Portanto:

1. são denominados de ramos 1, 2 e 3 aqueles que vão dos terminais 1, 2 e 3 até o ponto T, respectivamente;
2. em terminais monitorados a distância é medida do terminal até o ponto T;
3. em terminais não monitorados, a distância é medida do ponto T até o terminal remoto.

Para a compreensão da sistemática utilizada nos dois métodos propostos, faz-se necessária uma explanação, com alguns detalhes adicionais, do método existente de localização de faltas em sistemas elétricos com três terminais.

5.2 Método existente

O método existente de localização de faltas em circuitos T utiliza os registros obtidos nos três terminais (Evrenosoglu, 2005). É implementado em duas fases: a primeira chamada pré-localização, quando o ramo sob falta é identificado; e a segunda, quando a distância de falta é encontrada.

A pré-localização é realizada comparando a amplitude das ondas viajantes que refletem nos três terminais. Parte-se do princípio que no ramo sob falta, o valor máximo da onda refletida apresenta amplitude significativamente maior do que nos outros dois terminais. Sendo assim, através de uma simples comparação, entre os três sinais, o ramo sob falta é identificado. Em seguida, o algoritmo calcula a distância de falta utilizando apenas os dados provenientes do terminal do ramo sob falta. Os dados dos outros dois terminais são desconsiderados. Dessa forma, obtém-se o intervalo de tempo entre as duas primeiras reflexões de ondas viajantes, e a distância de falta é calculada da maneira rotineira, ou seja, de acordo com (5.1) e (5.2), para a primeira e segunda metade da LT, respectivamente.

$$d = \frac{\Delta t \cdot v}{2} \quad (5.1)$$

$$d = l - \frac{\Delta t \cdot v}{2} \quad (5.2)$$

Existem algumas desvantagens da utilização do método existente para a localização de faltas em circuitos T, dentre elas destacam-se:

- necessidade de monitoração constante nos três terminais da LT, o que tem por consequência custos mais altos de implementação do sistema de monitoração;
- dependendo da atenuação em cada ramo da LT, a fase de identificação pode falhar. Em outras palavras, o sinal pode chegar com menor intensidade no terminal do ramo sob falta do que em outros terminais, principalmente em função dos comprimentos de cada ramo da LT.

As seções 5.3 e 5.4 apresentam o desenvolvimentos de dois métodos alternativos.

5.3 *Localização de Falhas em Sistemas com três Terminais Utilizando Dados de dois Terminais*

Este primeiro método proposto tem por meta localizar a falta em qualquer ponto do sistema com três terminais, alocando-se medidores em apenas dois terminais.

Analogamente ao método existente, este método é implementado em duas etapas: (i) identificação do ramo sob falta; e (ii) localização da falta.

5.3.1 Identificação do Ramo sob Falta

Nesta etapa, deseja-se apenas saber qual dos três ramos do sistema elétrico sofreu a falta. Para tanto, utiliza-se o resultado obtido pelo cálculo da distância preliminar, descrito na Seção 4.4.1.3, na qual a distância de falta é calculada com base no intervalo de tempo entre a primeira reflexão de modo aéreo e a primeira reflexão de modo terra, como mostrado na equação (4.9).

Desta maneira, definindo os terminais 1 e 2 da Figura 5.1 como pontos de medição de tensão, as possibilidades existentes para a identificação do ramo sob falta são indicadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Identificação do ramo sob falta.

Situação	Condição de Teste	Veredicto
1	$d_{pre_1} < l_1$ e $d_{pre_2} > l_2$	Falta no ramo 1
2	$d_{pre_1} > l_1$ e $d_{pre_2} < l_2$	Falta no ramo 2
3	$d_{pre_1} > l_1$ e $d_{pre_2} > l_2$	Falta no ramo 3

Denomina-se l_n o comprimento do ramo n , cujo terminal está sendo monitorado. Qualquer situação de falta fará parte de uma das três condições mostradas na Tabela 5.1. Através do diagrama de Lattice, as três situações podem ser visualizadas conforme mostradas pelas figuras a seguir.

Observa-se na Figura 5.2 que a distância preliminar resultaria em um valor menor do que o comprimento do ramo 1, indicando que a falta ocorreu neste ramo. O mesmo acontece para o ramo 2, conforme Figura 5.3. Já para a falta no ramo 3, os intervalos de tempo medidos nos terminais 1 e 2, resultariam em distâncias preliminares maiores do que os comprimentos dos ramos 1 e 2, respectivamente, como ilustrado na Figura 5.4.

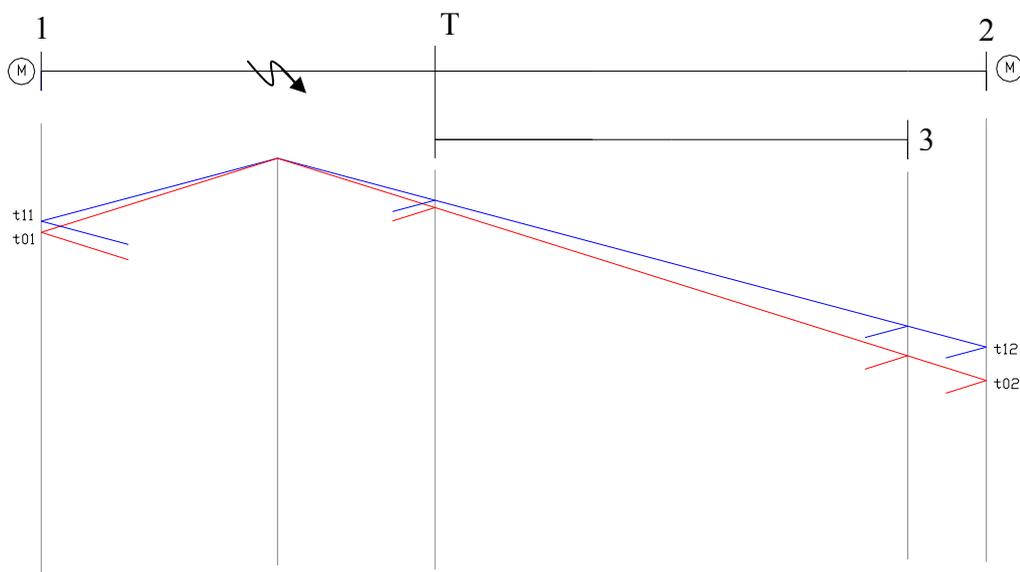


Figura 5.2 – Diagrama de Lattice para falhas no ramo 1.

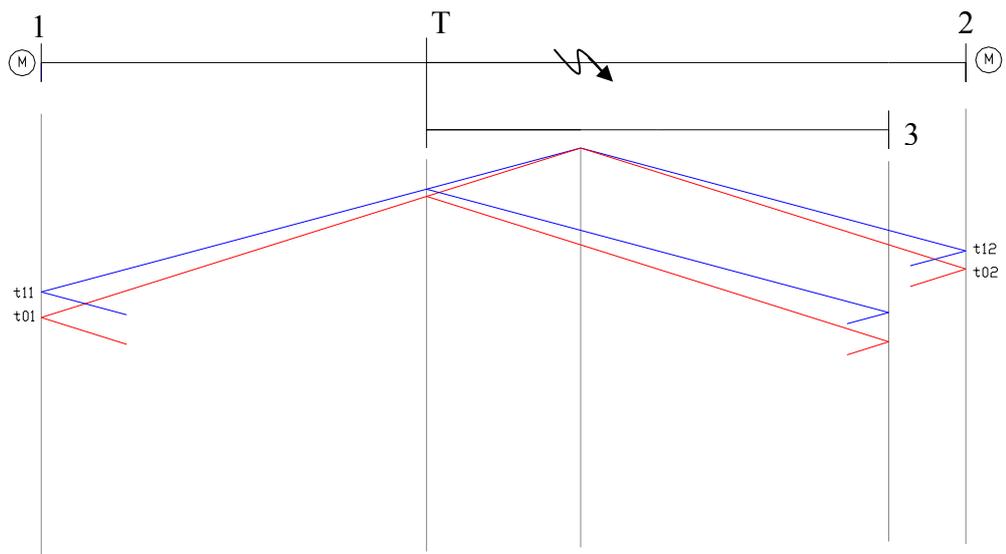


Figura 5.3 - Diagrama de Lattice para faltas no ramo 2.

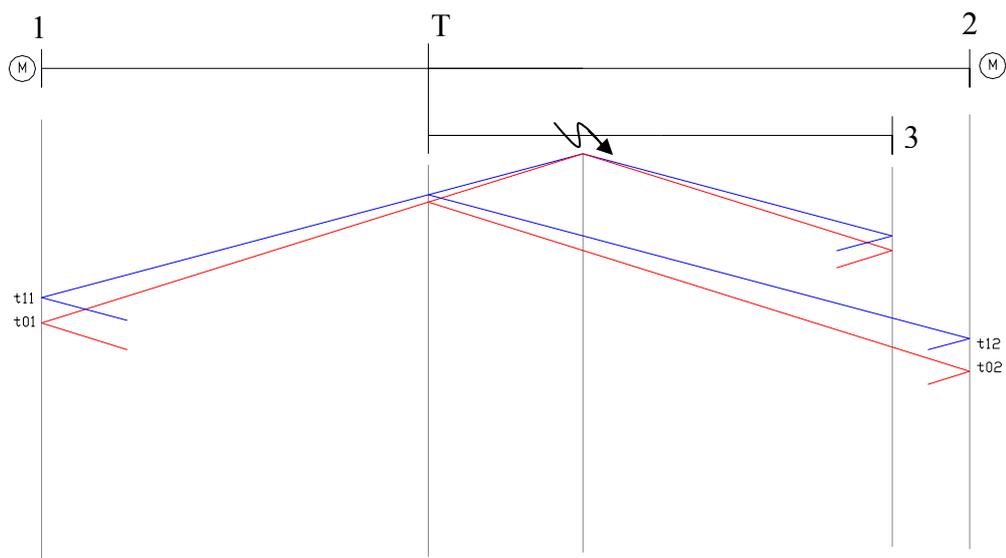


Figura 5.4 - Diagrama de Lattice para faltas no ramo 3.

5.3.2 Localização da Falta

Uma vez identificado o ramo sob falta, o algoritmo utiliza apenas os registros de tensão de um dos dois terminais. De acordo com a Tabela 5.1, para a situação 1, o algoritmo de localização utiliza os dados do terminal 1. Analogamente, para a situação 2, os dados do terminal 2.

Por fim, quando a falta ocorre no ramo cujo terminal não está sendo monitorado o algoritmo acessa uma sub-rotina de comparação de amplitude entre os sinais de reflexão das ondas viajantes dos terminais 1 e 2. É escolhido o terminal que apresente a maior amplitude ou a menor atenuação. Essa escolha reduz a possibilidade de erros em decorrência de perda de informação causada por atenuação.

De posse dos registros das reflexões das ondas viajantes no terminal escolhido o algoritmo passa a calcular a distância da falta. O algoritmo de cálculo foi implementado prevendo-se ramos de transmissão de diferentes comprimentos, bem como diferentes parâmetros de modelagem. Nessa última situação irão existir diferentes velocidades de propagação para cada ramo do circuito T. As expressões (5.3) e (5.4) gerenciam o cálculo de distância da falta, para a primeira e para a segunda metade de cada ramo da LT, respectivamente.

$$d = \frac{\Delta t_n \cdot v_h}{2} \quad (5.3)$$

$$d = l_h - \frac{\Delta t_n \cdot v_h}{2} \quad (5.4)$$

sendo n o terminal de monitoração escolhido e h o ramo sob falta.

No caso da falta ocorrer no ramo 3, a identificação de qual metade do ramo ela acontece é feita levando em consideração as diferentes velocidades de propagação dos ramos, uma vez que a onda viaja por dois ramos diferentes antes de chegar a um terminal de medição. Em outras palavras, inicialmente a onda percorre um trecho do ramo 3 com velocidade definida pelos parâmetros do ramo 3. Chegando ao ponto T, a onda é refratada e percorre o ramo monitorado com velocidade definida pelos seus parâmetros, até chegar ao terminal de monitoração.

Para um melhor entendimento deste primeiro método proposto um fluxograma é apresentado na Figura 5.5.

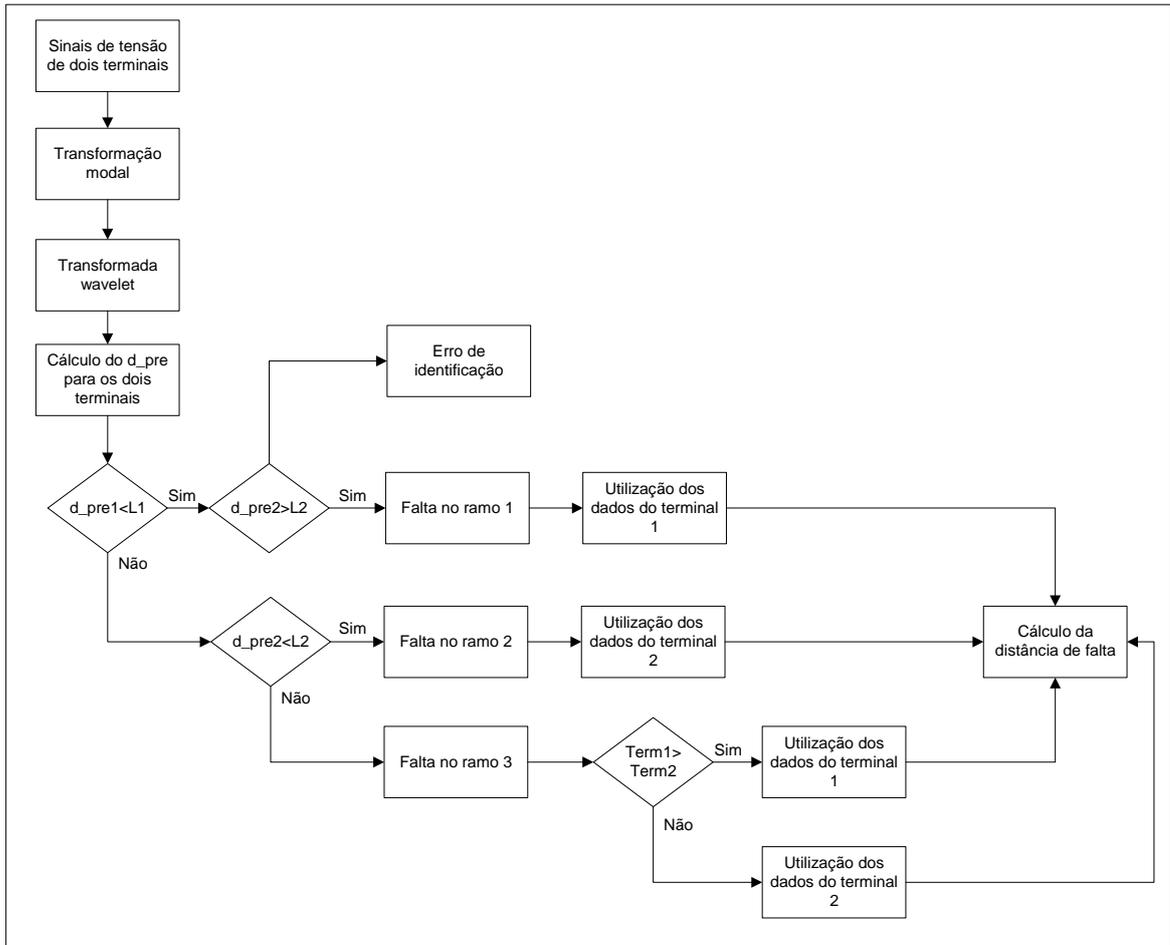


Figura 5.5 – Fluxograma do método proposto.

5.3.3 Comentários Sobre o Método

O método proposto mostra que para efetuar a localização de faltas em circuitos T a utilização dos dados dos três terminais é desnecessária, visto haver redundância entre eles. Tal constatação resulta em economia de equipamento na instalação de um sistema localizador de faltas em circuitos T.

5.4 Localização de Falhas em Sistemas com três Terminais Utilizando Dados de apenas um Terminal

Em seqüência ao raciocínio utilizado para propor o método apresentado na Seção 5.3, foi desenvolvido um outro método que localiza faltas em sistemas com três terminais, a partir da utilização dos registros de tensão de apenas um dos terminais. No entanto, é necessário fazer a seguinte consideração inicial: os dois ramos não monitorados devem possuir comprimentos diferentes. Tal necessidade é melhor avaliada no decorrer do desenvolvimento do método proposto e durante a apresentação dos resultados no Capítulo 6.

O método está estruturado em três etapas, podendo não ser necessária a realização de todas elas: a primeira, denominada de pré-identificação do ramo, define se a falta está no ramo monitorado ou não. Se sim, parte-se direto para a terceira etapa. Caso contrário, uma segunda etapa é necessária para identificar o ramo não monitorado sob falta. Finalmente, na última etapa a falta é localizada. As seções subseqüentes descrevem detalhadamente as três etapas do método proposto.

5.4.1 Pré-Identificação do Ramo sob Falta

Esta etapa consiste em uma determinação prévia do local de falta, definindo se a falta está localizada no ramo sob monitoração ou não. Para efeitos práticos, neste trabalho, o ramo sob monitoração é também denominado ramo 1.

Inicialmente é calculada a distância preliminar (d_{pre}) com base nas reflexões das ondas viajantes de modo aéreo e modo terra no terminal sob monitoração, de acordo com a equação (4.9).

Analisando o valor de d_{pre} têm-se apenas duas possibilidades:

1. d_{pre} menor ou igual ao comprimento do ramo 1;
2. d_{pre} maior do que comprimento do ramo 1.

Caso a possibilidade 1 seja verificada, a falta é identificada no ramo 1. Assim sendo, o algoritmo segue imediatamente para o procedimento de localização da falta, conforme descrito na Seção 5.4.3.

Caso a possibilidade 2 seja verificada, a falta pode estar no ramo 2 ou no ramo 3. Assim sendo, faz-se necessária a avaliação das possibilidades de local de falta, para a definição do ramo, conforme apresentado na Seção 5.4.2.

5.4.2 Avaliação das Possibilidades e Identificação do Ramo sob Falta

Inicialmente, deve-se identificar os instantes das duas primeiras reflexões das ondas viajantes de modo aéreo. Calculando-se o intervalo de tempo, a partir desses instantes, têm-se as quatro naturais possibilidades para a ocorrência, conforme descrito abaixo:

1. falta na primeira metade do ramo 2;
2. falta na segunda metade do ramo 2;
3. falta na primeira metade do ramo 3;
4. falta na segunda metade do ramo 3.

A avaliação das possibilidades de localização da falta fica melhor explicada através de um exemplo: seja uma falta a 40 km do “ponto T”, no ramo 3 da LT da Figura 5.1. Os ramos para este exemplo medem, respectivamente, 100 km, 140 km e 120 km.

Os coeficientes *wavelet* que enfatizam os instantes de reflexões das ondas viajantes (modo aéreo), no ramo monitorado, são mostrados na Figura 5.6.

De posse do intervalo de tempo entre as duas primeiras reflexões e da velocidade de propagação de modo aéreo, as possíveis distâncias de falta, utilizando as expressões (4.3) e (4.6), são:

1. falta a 39,70 km no ramo 2;
2. falta a 100,30 km no ramo 2;
3. falta a 39,70 km no ramo 3;
4. falta a 80,30 km no ramo 3.

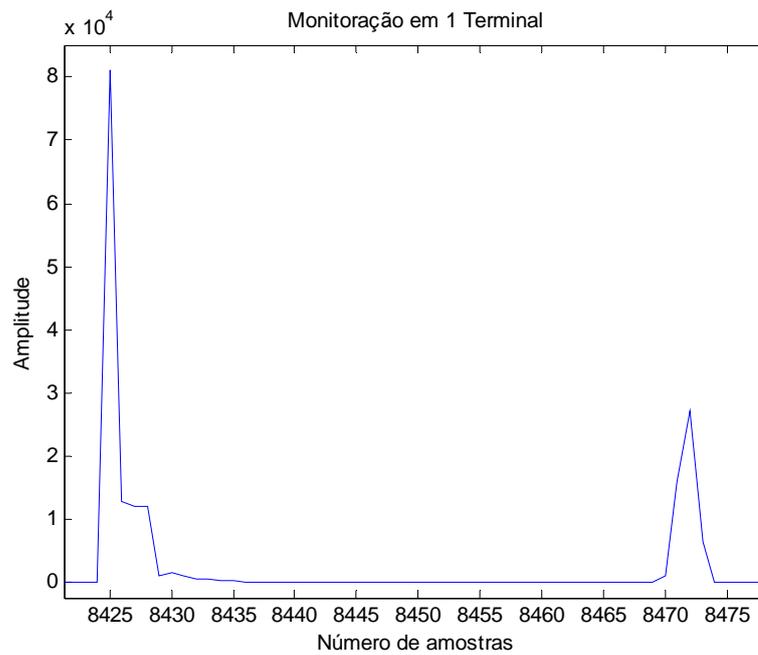


Figura 5.6 – Instantes de reflexão.

Para a determinação de uma das possibilidades, lançar-se-á mão de uma terceira onda que chega ao terminal. Essa reflexão é encontrada diferentemente para faltas na primeira e na segunda metade dos ramos da LT. Por exemplo, para a ocorrência na primeira metade do ramo, a terceira reflexão de interesse, ocorrida no tempo t_3 , é devida à onda que reflete no terminal oposto e retorna ao ponto de medição, como mostra o diagrama de Lattice da Figura 5.7. Já para a ocorrência na segunda metade da linha, a terceira reflexão de interesse, também ocorrida no tempo t_3 , é devida à onda viajante que reflete no ponto de falta e volta ao terminal de monitoração, como mostra o exemplo do diagrama da Figura 5.8.

Pode-se mostrar que para o caso de faltas nas primeiras metades dos ramos, o tempo da terceira reflexão é dado pela equação (5.5).

$$t_3 = \frac{2(l_h - d)}{v_h} + t_1 \quad (5.5)$$

Já para faltas nas segundas metades dos ramos, o cálculo deve ser realizado de acordo com a expressão (5.6).

$$t_3 = \frac{2d}{v_h} + t_1 \tag{5.6}$$

onde h identifica o ramo em questão.

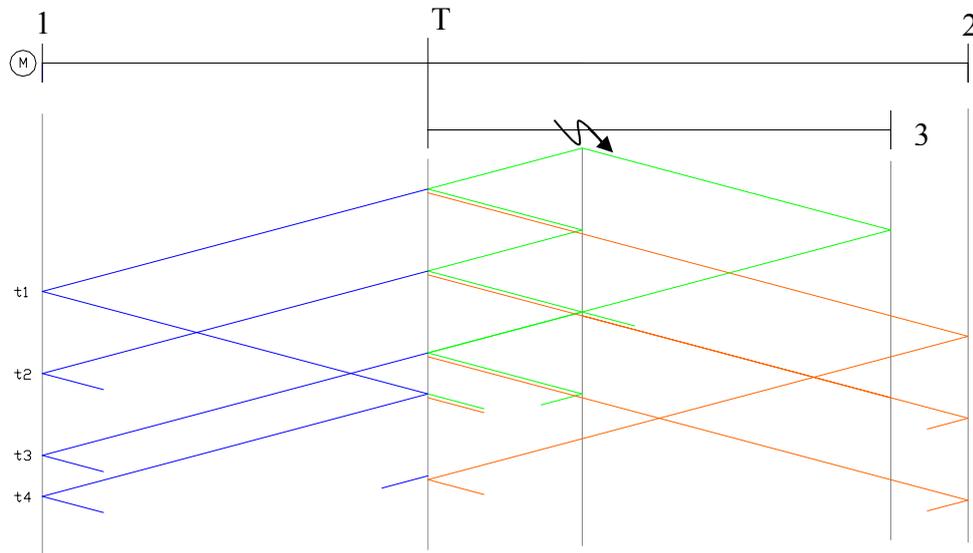


Figura 5.7 – Diagrama de Lattice para faltas na primeira metade das LTs.

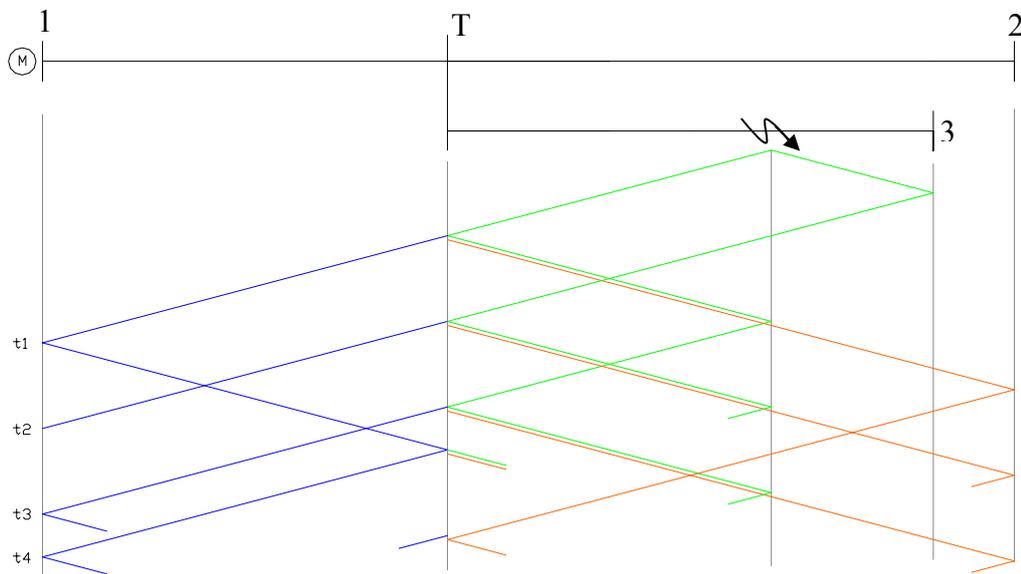


Figura 5.8 – Diagrama de Lattice para faltas na segunda metade das LTs.

Desta maneira, para o exemplo apresentado, é encontrado o valor de t_3 para as quatro possibilidades, como mostra a Tabela 5.2. Também é calculado o valor correspondente em números de amostras para cada valor de t_3 .

O resultado de t_3 calculado para a possibilidade 1 é igual ao calculado para a possibilidade 2. O mesmo acontece entre as possibilidades 3 e 4. Em outras palavras existirá um valor de t_3 para cada ramo, dessa maneira a determinação do valor correto de t_3 resultará na identificação do ramo sob falta.

Tabela 5.2 – Valores calculados de t_3 .

Ramo	Distância de falta [km]	t_1 medido [s]	Comprimento do ramo [km]	t_3 calculado [s]	Amostra
2	39,70	0,02527	140	0,02598	8562
2	100,30	0,02527	140	0,02598	8562
3	39,70	0,02527	120	0,02584	8516
3	80,30	0,02527	120	0,02584	8516

Assim sendo, o próximo passo é a comparação dos instantes t_3 calculados com o sinal de coeficientes *wavelet* medido, de acordo com a Figura 5.9.

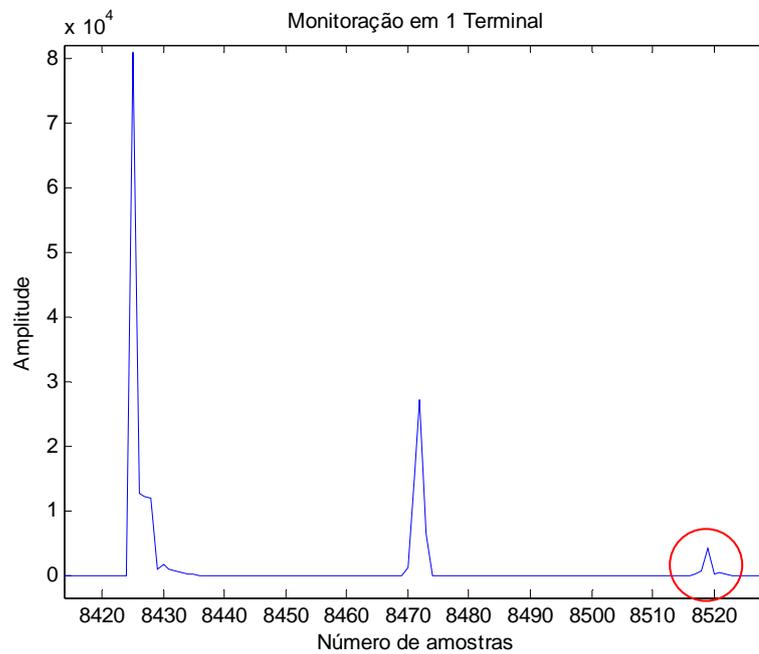


Figura 5.9 – Identificação da terceira reflexão de interesse.

Observa-se que foi encontrado um instante t_3 correspondente à amostra 8518, que se aproxima bastante do valor de t_3 calculado para o ramo 3 (8516).

Aplicando-se o valor de t_3 obtido da análise da Figura 5.9 na equação (5.5), obtém-se o valor do comprimento do ramo sob falta. Assim,

$$l_h = \frac{(t_3 - t_1)v_h + 2d}{2} = 121,22 \text{ km}$$

Desta maneira, a falta tem sua ocorrência identificada no ramo 3. Em outras palavras, 121,22 km é um valor mais próximo do comprimento do ramo 3 (120 km) do que do comprimento do ramo 2 (140 km).

Neste caso, foi encontrado apenas um instante que se aproxima bastante a um dos dois instantes calculados para t_3 .

5.4.3 Localização da Falta

Tendo sido realizado o procedimento discutido nas seções 5.4.1 e 5.4.2, o cálculo da distância de falta é imediato, utilizando para tal apenas os dois primeiros picos de reflexão das ondas viajantes no modo aéreo.

Resta apenas saber se a falta ocorreu na primeira ou na segunda metade do ramo. Esse problema é resolvido da mesma maneira que é feita em todos os métodos utilizados neste trabalho, ou seja, a utilização do cálculo da distância preliminar.

No exemplo mostrado, esta avaliação indica a ocorrência da falta na primeira metade do ramo identificado, o que leva ao seguinte valor final:

$$d = \frac{\Delta t \cdot v_3}{2} = 39,70 \text{ km}$$

Para elucidar melhor o segundo método proposto, o fluxograma da Figura 5.10 mostra os principais caminhos do algoritmo.

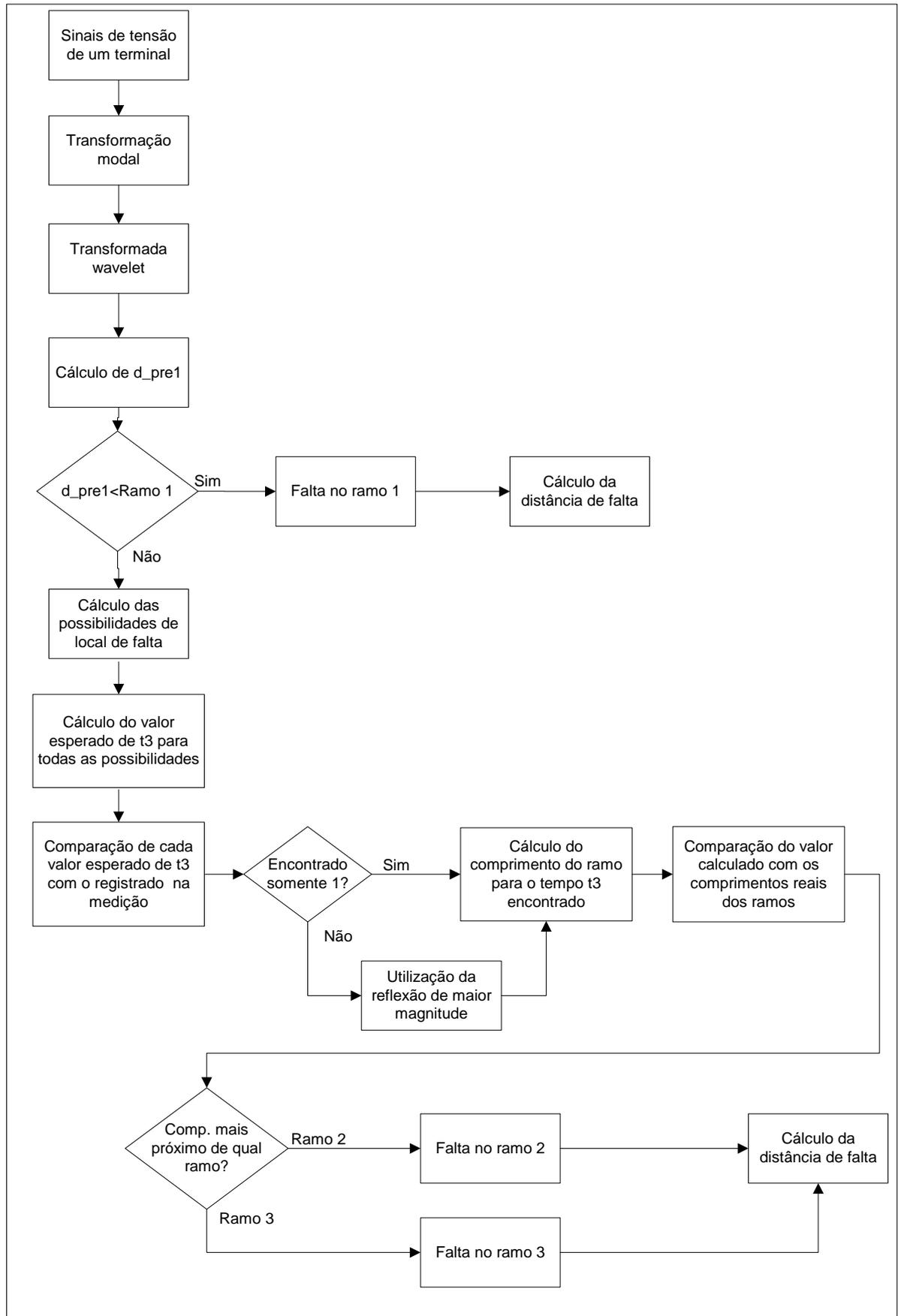


Figura 5.10 – Fluxograma do método proposto.

5.5 Considerações Finais

Foram apresentados dois métodos como alternativa ao método existente.

Visto que o segundo método proposto utiliza dados de apenas um terminal, ele é mais econômico do que os anteriores. Porém, algumas considerações se fazem necessárias:

1. conforme já comentado, o método é limitado para LTs com ramos não monitorados de diferentes comprimentos. No entanto, trata-se de uma consideração bem razoável, haja vista que em um sistema real a possibilidade de dois ou mais ramos de um circuito T possuírem o mesmo comprimento é bem remota;
2. o procedimento para a identificação do ramo sob falta é mais complexo e menos confiável porque ele depende de uma terceira reflexão. Em caso de atenuações muito elevadas esta reflexão pode não ser capturada, comprometendo a localização de falta. Nesse sentido, o primeiro método proposto é mais robusto.

Resultados apresentados no Capítulo 6 comprovam tais comentários.

Capítulo 6

Resultados

*“Eu permito a todos serem como quiserem,
e a mim como devo ser.”*

Francisco Cândido Xavier

6.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo mostrar e analisar os principais resultados obtidos pelas simulações computacionais realizadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Foi realizada uma grande quantidade de simulações, cada qual representando uma situação de interesse, sendo que para qualquer um dos métodos implementados cada situação foi avaliada: sistemas com dois terminais, sistemas com três terminais, tipo de filtragem, variação da distância da falta, da resistência e do ângulo de incidência de falta e da razão sinal ruído.

Na análise dos resultados obtidos procurou-se identificar quais variáveis influenciaram diretamente no processo de localização de falta.

6.2 Linhas de Transmissão com 2 Terminais

Inicialmente são analisados os resultados obtidos, com vistas à aplicação do método proposto para simulações de faltas fase-terra em sistemas com dois terminais, mostrado na Figura 6.1. Esses sistemas simulados têm por tensão base 138 kV e a LT tem comprimento de 120 km. A taxa de amostragem utilizada nas simulações é de 333 kHz. Foi utilizada na decomposição a *wavelet* mãe db2.

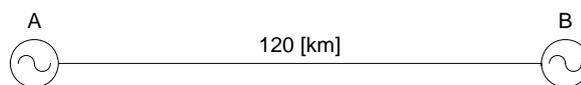


Figura 6.1 – Sistema com dois terminais

O terminal de envio é denotado A e o terminal de recepção B.

As sub-seções contidas na Seção 6.2 apresentam os resultados obtidos, bem como suas respectivas análises.

6.2.1 Variação da Distância de Falta

Em princípio, foi feita uma avaliação da exatidão do cálculo da distância de falta, quando ela ocorre em diversos pontos da LT. A Tabela 6.1 mostra o local verdadeiro simulado, a distância calculada, bem como seu erro em relação ao valor verdadeiro com base no comprimento da LT, de acordo com a expressão (6.1).

$$\varepsilon = \frac{|d_{verd} - d_{est}|}{l} 100 \% \quad (6.1)$$

onde d_{verd} é a distância de falta verdadeira, d_{est} é a distância de falta estimada e l é o comprimento da LT.

Tabela 6.1 – Resultados para faltas em vários ponto da linha.

Distância de falta real [km]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
5	5,91	0,76
10	10,14	0,11
15	14,36	0,53
20	19,43	0,48
25	25,34	0,29
30	29,57	0,36
35	33,79	1,01
40	39,70	0,25
45	43,93	0,89
50	48,15	1,54
55	53,22	1,48
60	58,29	1,43
65	65,94	0,78
70	71,00	0,84
75	76,07	0,89
80	80,30	0,25
85	85,37	0,30
90	91,28	1,06
95	94,66	0,29
100	100,57	0,48
105	104,79	0,17
110	107,33	2,23
115	112,40	2,17

Pode-se observar que as piores situações para a localização ocorreram quando a falta está próxima ao terminal B. Esse é um comportamento normal para os métodos baseados na teoria das ondas viajantes, uma vez que, para tais situações, a identificação dos dois instantes de reflexão pode ficar comprometida, em função da taxa de amostragem usada, bem como da atenuação dos sinais. O erro obtido poderia ser reduzido caso a taxa de amostragem utilizada fosse maior, fato que melhoraria a resolução de duas reflexões muito próximas.

Nota-se também que para faltas próximas à metade da LT ocorrem erros maiores, em torno de 1,5 %. O que acontece para tais situações é que o algoritmo pode identificar erroneamente em qual metade da LT a falta ocorreu.

Uma visualização melhor do comportamento da magnitude do erro em função da distância da falta simulada é mostrada na Figura 6.2.

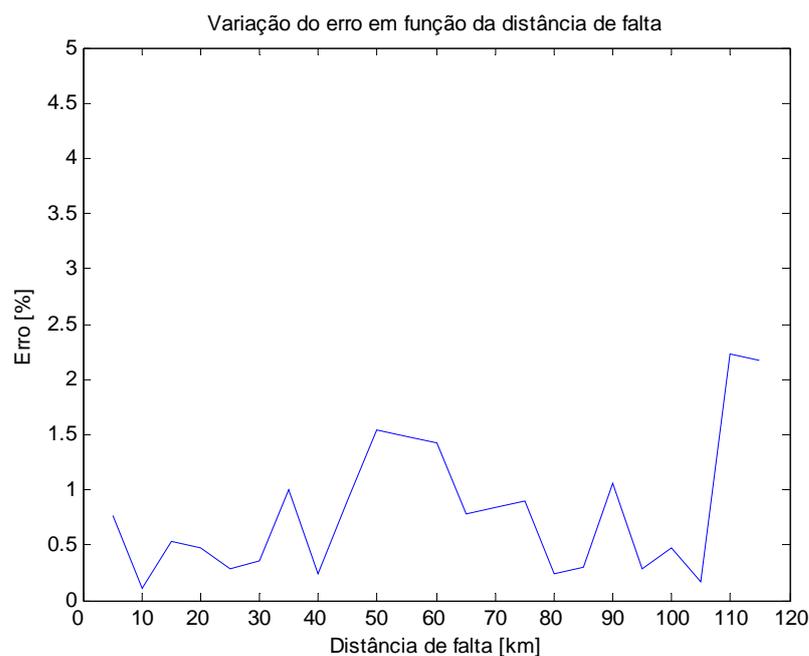


Figura 6.2 – Variação do erro em função da distância de falta.

Pode-se concluir então que o algoritmo apresenta resultados aceitáveis quanto à exatidão desde que a falta não esteja localizada muito próximas dos extremos ou da metade da LT. Mesmo nessas piores situações, o algoritmo mostrou uma exatidão aceitável, tendo em vista o erro absoluto em quilômetros.

6.2.2 Variação da Resistência de Falta

Um dos parâmetros que define um determinado curto-circuito é a resistência no caminho da falta, principalmente quando se trata de uma falta fase-terra. Neste trabalho, foram simuladas situações com diversas resistências de falta; no entanto, são analisadas apenas as principais situações que são: 0, 50, 100, 150 e 200 Ω .

Esta variação de resistência de falta foi realizada para todas as situações de distâncias de falta simuladas, de acordo com a Seção 6.2.1. O ângulo de incidência de falta para todas simulações foi adotado igual a zero graus, ou seja, a condição na qual a tensão passa pelo seu valor mínimo.

Porém, para efeitos práticos, as tabelas a seguir trazem os resultados para a ocorrência de falta a 20, 40, 70 e 90 km, respectivamente.

Observa-se que, para todas as situações analisadas, a mudança do valor de resistência de falta não influenciou na exatidão dos resultados obtidos para a localização de faltas.

Tabela 6.2 – Resultados para a falta a 20 km

Resistência de falta [Ω]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	19,43	0,48
50	19,43	0,48
100	19,43	0,48
150	19,43	0,48
200	19,43	0,48

Tabela 6.3 – Resultados para a falta a 40 km.

Resistência de falta [Ω]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	39,70	0,25
50	39,70	0,25
100	39,70	0,25
150	39,70	0,25
200	39,70	0,25

Tabela 6.4 – Resultados para a falta a 70 km.

Resistência de falta [Ω]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	71,00	0,84
50	71,00	0,84
100	71,00	0,84
150	71,00	0,84
200	71,00	0,84

Tabela 6.5 – Resultados para a falta a 90 km.

Resistência de falta [Ω]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	89,59	0,34
50	89,59	0,34
100	89,59	0,34
150	89,59	0,34
200	90,44	0,36

Raramente foi observada uma mudança, por menor que fosse, na magnitude do erro, em decorrência do aumento ou da diminuição da impedância de falta. Esse comportamento comprova a eficácia da sub-rotina de diminuição do limiar, apresentada na Seção 4.4.

Em outras palavras, a inclusão dessa sub-rotina tornou o algoritmo de localização de faltas extremamente insensível a variações da resistência de falta.

6.2.3 Variação do Ângulo de Incidência de Falta

Um fator de bastante importância quando da ocorrência de uma falta em um sistema elétrico de potência é o instante em que ela ocorre ou, em outras palavras, o ângulo de incidência no instante inicial da falta ($t=0$). Esse ângulo é medido tomando como referência à tensão da fase sob falta, considerando $v(t) = V_M \text{sen}(\omega t + \phi)$, para $t = 0$.

Quanto mais o ângulo de incidência de falta se aproxima de 0° , menos evidentes são os transitórios causados pela falta. Em contrapartida, quanto mais ele se aproxima de 90° , mais evidentes são os transitórios. Esse comportamento pode ser observado pelas Figuras 6.3 e 6.4 que mostram os sinais das reflexões das ondas viajantes para ângulos de incidência de 0° e 90° , respectivamente. Verifica-se considerável diferença nas amplitudes entre as duas condições de ângulos de incidência.

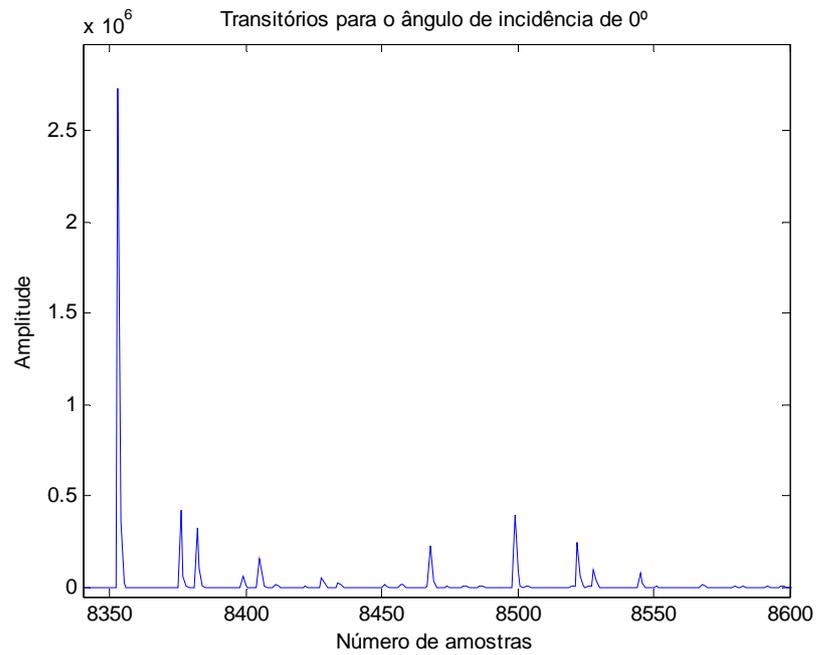


Figura 6.3 – Transitórios para o ângulo de incidência de 0°.

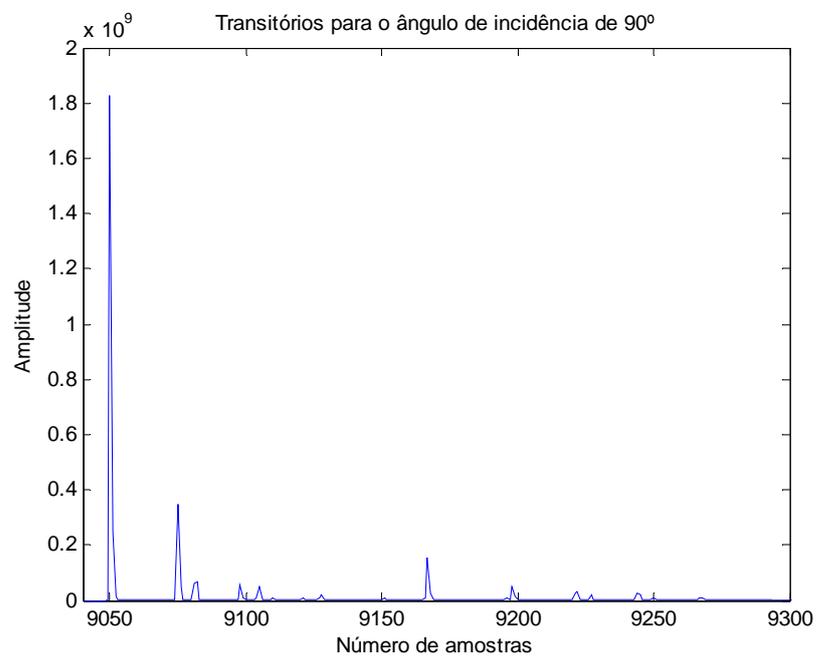


Figura 6.4 – Transitórios para o ângulo de incidência de 90°.

Foram realizadas diversas simulações com diferentes ângulos de incidência de falta e em diferentes locais de falta ao longo da LT. As tabelas a seguir apresentam os resultados para a ocorrência de falta a 20, 35, 70 e 110 km, respectivamente.

Tabela 6.6 – Resultados para a falta a 20 km.

Ângulo de falta [°]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	19,42	0,48
30	21,12	0,93
60	21,12	0,93
90	21,12	0,93

Tabela 6.7 – Resultados para a falta a 35 km.

Ângulo de falta [°]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	33,79	1,01
30	36,32	1,10
60	36,32	1,10
90	35,48	0,40

Tabela 6.8 – Resultados para a falta a 70 km.

Ângulo de falta [°]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	71,00	0,84
30	70,16	0,14
60	69,32	0,57
90	69,32	0,56

Tabela 6.9 – Resultados para a falta a 110 km.

Ângulo de falta [°]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
0	107,33	2,23
30	109,86	0,11
60	109,86	0,11
90	109,87	0,11

Seria esperado que a exatidão do cálculo da distância de falta sempre diminuísse à medida que o ângulo de incidência se aproximasse de zero; no entanto, em alguns dos casos isso não ocorreu. Para as quatro situações mostradas, não se notou tal comportamento e, em alguns casos, inclusive a melhor exatidão não foi verificada para a condição de ângulo de incidência 90°.

Em contrapartida, para as situações 35 e 70 km o melhor resultado obtido foi para a condição de ângulo de incidência igual a 90° , o que condiz com o comportamento teoricamente esperado, uma vez que os transitórios são mais evidentes.

Analisando os resultados, conclui-se que o ângulo de incidência de falta é uma variável que influencia o cálculo da distância de falta. Porém, é difícil notar uma correlação entre a exatidão do resultado e a variação do ângulo de incidência de falta. No entanto, na maioria das situações a condição de 90° foi a que obteve melhores resultados. Cabe mais uma vez enfatizar que tal resultado se deve ao algoritmo de busca do melhor limiar.

6.2.4 Variação da Razão Sinal Ruído

A quantidade de ruído presente nos sinais registrados é um fator que pode influenciar no resultado da localização de faltas quando se trabalha com ondas viajantes. Isto porque a transformada *wavelet* é sensível a ruídos não correlacionados (ruídos branco), e sua resposta pode ser alterada função da amplitude desses ruídos. Se o nível de ruído não correlacionado é elevado, o ruído confunde-se com os transitórios de falta. Para exemplificar a situação da existência de ruído em sinais de potência, a Figura 6.5 ilustra um sinal de tensão sob falta com uma razão sinal ruído (SNR) de 80 dB, e a Figura 6.6 o mesmo sinal com SNR de 20 dB.

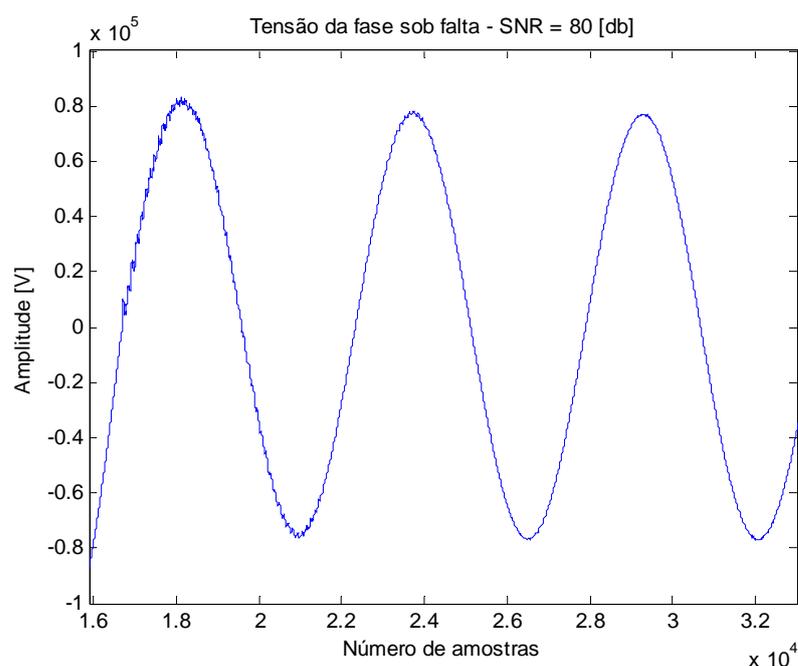


Figura 6.5 – Sinal com SNR de 80 dB.

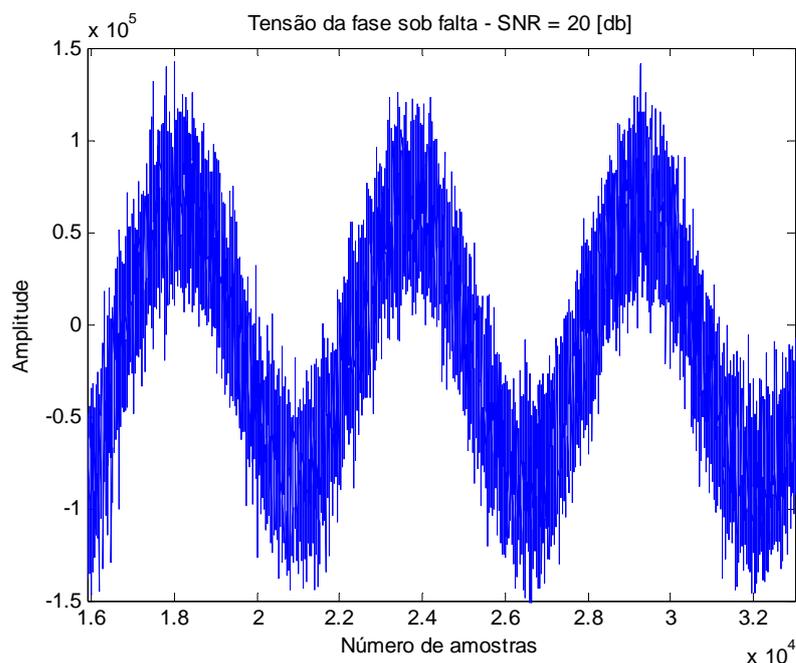


Figura 6.6 – Sinal com SNR de 20 dB.

Resta agora saber qual a influência do valor SNR sobre a exatidão do local de falta. Para tanto, o algoritmo de localização de faltas foi submetido a diversas situações de razão sinal ruído. Foram aplicados ruídos diferentes e iguais para as três fases monitoradas.

A Tabela 6.10 mostra os resultados para uma falta localizada a 30 km e a Tabela 6.11 os resultados para uma falta localizada a 100 km.

Tabela 6.10 – Resultados para a falta a 30 km.

SNR [dB]	Ruídos diferentes para as 3 fases		Ruídos iguais para as 3 fases	
	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
80	29,57	0,36	29,57	0,36
60	30,41	0,34	29,57	0,36
50	8,45	17,96	29,57	0,36
40	3,38	22,18	29,57	0,36
20	10,14	16,55	29,57	0,36
10	5,91	20,08	29,57	0,36

Tabela 6.11 – Resultados para a falta a 100 km.

SNR [dB]	Ruídos diferentes para as 3 fases		Ruídos iguais para as 3 fases	
	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
80	100,57	0,48	100,57	0,48
60	100,57	0,48	100,57	0,48
50	1,69	81,92	100,57	0,48
40	10,13	74,89	19,43	67,14
20	5,07	79,11	19,43	67,14
10	5,07	79,11	19,43	67,14

Observa-se que, para a aplicação de ruídos diferentes nas três fases sob monitoração, o algoritmo é incapaz de localizar faltas para SNR menor ou igual a 50 dB. A partir desse valor os transitórios de falta foram mascarados pelo ruído branco.

Cabe enfatizar que tais situações com baixo valor de SNR (menor do que 60 dB) não são muito comuns em sinais de tensão medidos nos terminais das LTs, fato que alivia a preocupação com tal problema.

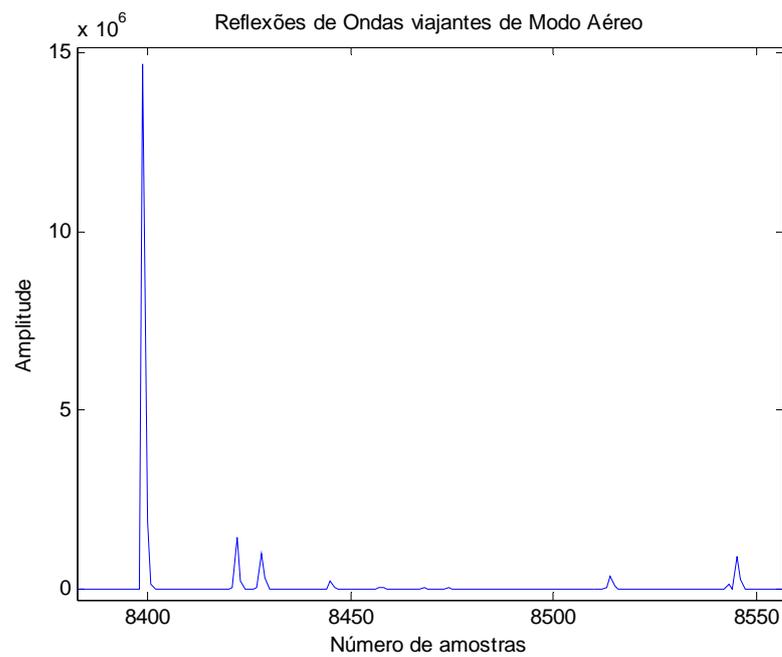
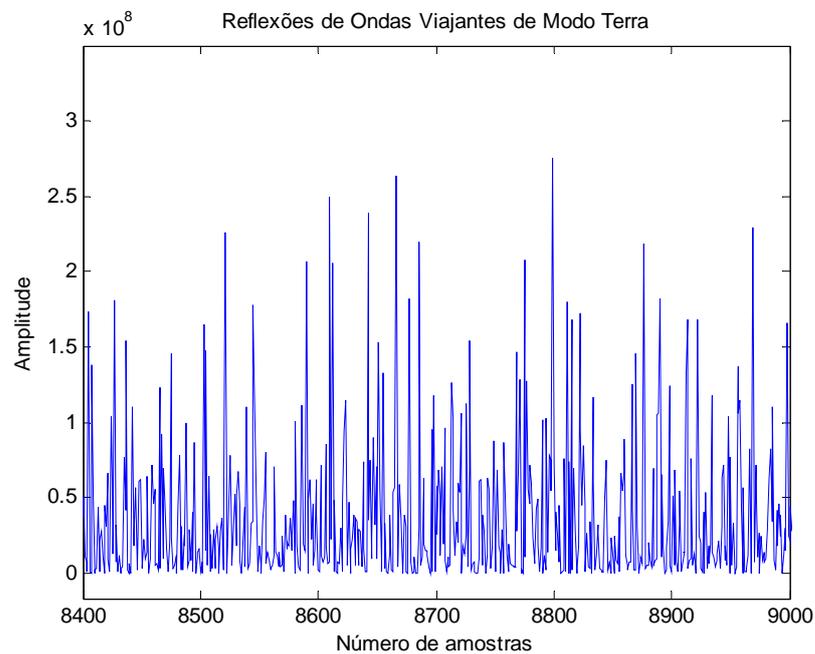
Não é possível definir um comportamento proporcional entre o valor da SNR e o resultado da distância de falta calculada, pois uma vez que os transitórios de falta se confundem com o ruído, o algoritmo pode falhar em obter os dois primeiros picos das ondas viajantes.

Por outro lado, observa-se um comportamento muito interessante quando adicionando o mesmo nível ruído nas três fases. Para faltas localizadas na primeira metade da LT, o algoritmo não se sensibiliza com a variação da SNR. Já para faltas na segunda metade da linha, para sinais com SNR menor ou igual a 40 dB, o algoritmo não consegue calcular o local de falta, pois identifica de forma errada em qual metade da LT ocorre o evento.

Como a identificação é feita através do valor da distância preliminar calculada, pode-se concluir que a diminuição da SNR influencia diretamente na identificação dos instantes de reflexão somente no modo terra, quando os ruídos são iguais nas três fases.

A Figura 6.7 mostra, para tais condições, os coeficientes *wavelet* para o modo aéreo, o qual não sofre qualquer influência do valor SNR.

Já a Figura 6.8 mostra os coeficientes *wavelet* para o modo terra. Nela é possível observar a forte influência do aumento do nível de ruído no sinal de tensão medido no terminal da LT.

**Figura 6.7 – Reflexões de modo aéreo.****Figura 6.8 – Reflexões de modo terra.**

A partir destes resultados conclui-se que o ruído não correlacionado no sinal de tensão acarreta problemas para o algoritmo de localização de faltas, uma vez que para certos valores de SNR o algoritmo não identifica corretamente a metade da linha sob falta.

A operação de transformação modal se mostra capaz de deixar os sinais de modos aéreos imunes à influência causada pelo ruído não correlacionado nos sinais de tensão, desde que tal ruído tenha afetado igualmente os sinais das três fases.

6.2.5 Substituição da Transformada *Wavelet* por Filtros Digitais

Uma questão que tem sido muito discutida ultimamente, quando se objetiva a localização de faltas através da teoria das ondas viajantes, é o quanto a utilização da transformada *wavelet* é adequada. Nesse ponto, torna-se interessante realizar uma avaliação sobre a substituição da transformada *wavelet* por outro tipo de filtragem digital. Neste trabalho, testes foram feitos, sem no entanto exaurir tal questão, substituindo a transformada *wavelet* por um filtro tipo IIR.

Em princípio, pode-se dizer que a transformada *wavelet* possui uma resposta mais rápida do que um filtro IIR. Por outro lado, a flexibilidade de definição de frequências de corte possibilitada pela utilização de filtros é muito maior do que a permitida pela transformada *wavelet*.

Estes prós e contras devem ser devidamente ponderados com o intuito de se decidir sobre qual das duas técnicas é mais adequada para cada aplicação.

Para tanto, as duas abordagens foram aplicadas e, com base nos resultados obtidos foi feita uma comparação de suas exatidões.

Antes de analisar os resultados são plotados, a título ilustrativo, os coeficientes *wavelet* das reflexões de ondas viajantes, quando utilizada a transformada *wavelet*, em seu primeiro nível de decomposição, conforme mostrado na Figura 6.9. Tais coeficientes podem ser comparados com os de um filtro IIR passa-alta, tipo Butterworth, de 4ª ordem e frequência de corte 80 kHz, conforme apresentado na Figura 6.10. A frequência de corte de 80 kHz foi escolhida em conformidade com a faixa de frequência varrida pela transformada *wavelet* em seu primeiro nível de decomposição, que é de 83,25 a 166,5 kHz, uma vez que a taxa de amostragem é de 333 kHz.

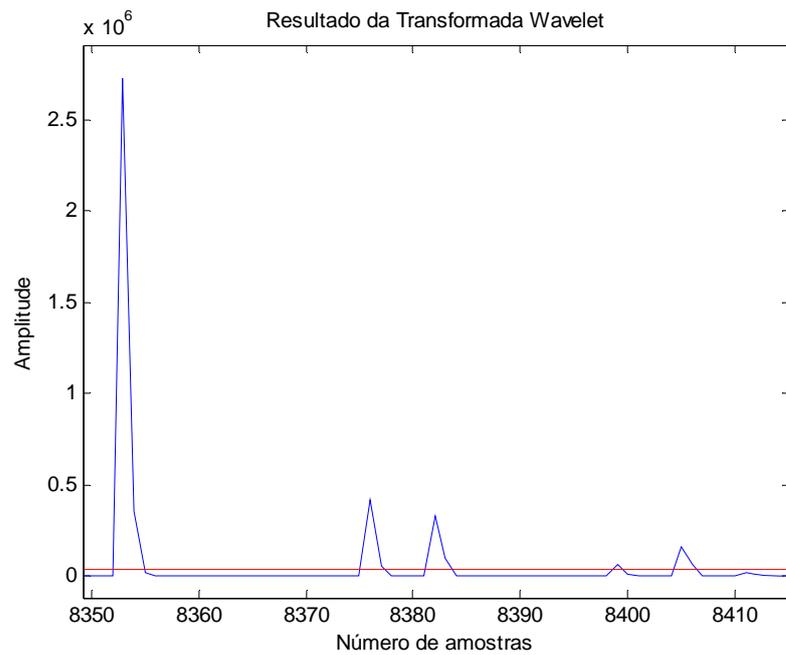


Figura 6.9 – Reflexões utilizando a transformada *wavelet*.

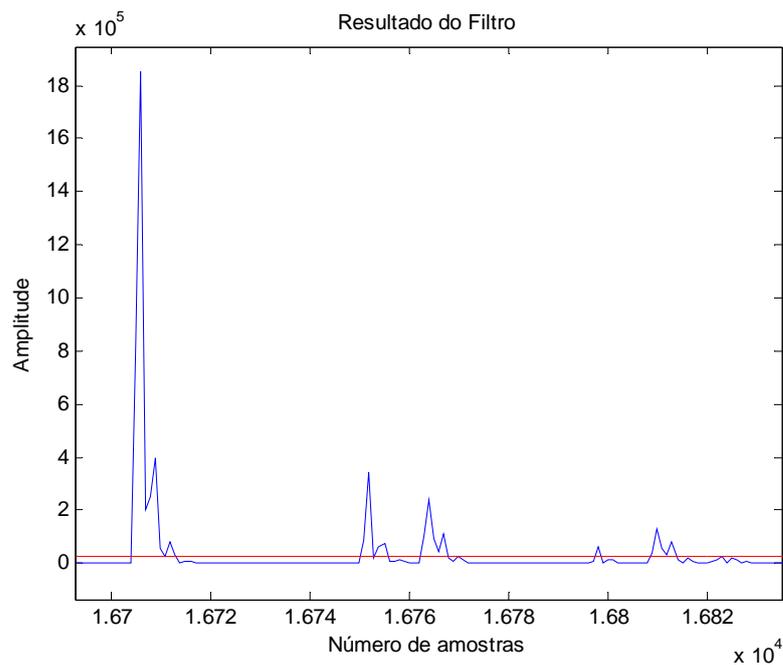


Figura 6.10 – Reflexões utilizando o filtro IIR passa-alta.

Assim procedendo, haverá uma coerência entre os resultados obtidos pelas duas técnicas. Em outras palavras, se forem calculadas as distâncias de falta para os sinais das Figuras 6.9 e 6.10, os resultados devem ser idênticos.

A frequência de corte escolhida para o filtro IIR influi diretamente no resultado gerado pelo algoritmo de localização de falta. Um estudo sobre o comportamento da

distância de falta calculada em função da frequência de corte de um filtro passa-alta é mostrado na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Influência da frequência de corte escolhida.

Frequência de corte [kHz]	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	34,64	12,20
10	2,54	14,55
20	1,27	15,61
50	19,43	0,48
80	19,43	0,48
100	19,43	0,48

É interessante notar que para as frequências de corte de 1, 10 e 20 kHz, o algoritmo de localização identificou o pico de reflexão de forma errônea. Embora o pico de reflexão correto existisse, ele foi encoberto pela aparição de frequências abaixo de 50 kHz. A partir de 50 kHz, o algoritmo respondeu de forma correta e com boa exatidão, como observado nas três últimas medidas mostradas na Tabela 6.12.

É também importante analisar a resposta do algoritmo, utilizando tais filtros digitais seletivos (FD) e a transformada *wavelet* (TW), em função da distância de ocorrência da falta. A Tabela 6.13 mostra uma comparação dos resultados obtidos para faltas fase-terra a cada 5 km. Observa-se que o filtro teve exatidão superior à transformada *wavelet* em 7 situações, igual em 10 situações, e inferior em 6 situações. Essa tendência se manteve para diversas outras situações. Isso demonstra um equilíbrio entre a exatidão dos resultados, o que leva a crer que não existe uma dependência forte entre o tipo de abordagem utilizada e os resultados obtidos.

Desta maneira pode-se concluir que, se as frequências varridas por filtros IIR e pela transformada *wavelet* forem semelhantes, a técnica escolhida não interfere de maneira significativa no resultado de localização da falta.

Considerando a característica de alta frequência dos sinais de reflexões de ondas viajantes, a utilização da transformada *wavelet*, em seu primeiro nível de decomposição, é adequada, uma vez que ela varra a faixa frequência de interesse.

Tabela 6.13 – Comparação entre FD e TW.

Distância de falta real [km]	Distância FD [km]	Erro percentual FD [%]	Distância TW [km]	Erro percentual TW [%]	Melhor exatidão
5	5,49	0,41	5,91	0,76	FD
10	10,14	0,11	10,14	0,11	-
15	14,36	0,53	14,36	0,53	-
20	19,43	0,48	19,43	0,48	-
25	24,92	0,07	25,34	0,29	FD
30	29,57	0,36	29,57	0,36	-
35	33,79	1,01	33,79	1,01	-
40	39,28	0,60	39,70	0,25	TW
45	42,66	1,95	43,93	0,89	TW
50	48,15	1,54	48,15	1,54	-
55	53,22	1,48	53,22	1,48	-
60	58,29	1,43	58,29	1,43	-
65	65,94	0,78	65,94	0,78	-
70	71,85	1,54	71,00	0,84	TW
75	75,65	0,54	76,07	0,89	FD
80	81,99	1,65	80,30	0,25	TW
85	86,21	1,01	85,37	0,30	TW
90	91,28	1,06	91,28	1,06	-
95	95,08	0,07	94,66	0,29	FD
100	100,15	0,12	100,57	0,48	FD
105	105,22	0,18	104,79	0,17	TW
110	109,86	0,11	107,33	2,23	FD
115	114,93	0,06	112,40	2,17	FD

Isto faz com que o algoritmo fique rápido e “leve”, visto que a TW exige menor carga de processamento do que a de um filtro seletivo.

Em contrapartida, a utilização de filtros IIR pode ser mais eficiente quando o sinal possui uma razão sinal ruído baixa. Nessas condições pode-se definir um filtro passa-faixa tal que seja possível isolar apenas os transitórios de interesse provenientes da ocorrência da falta no sistema elétrico. Para situações desse tipo, deve-se fazer um estudo prévio do sinal e de seus componentes de frequência, objetivando a melhor definição da faixa de frequência de atuação do filtro IIR.

Porém, cabe mencionar que se for utilizado um filtro de menor ordem, a identificação de dois picos de reflexão próximos pode ficar comprometida, devido à baixa seletividade na banda de transição. Tal problema não é encontrado quando da utilização da TW.

Por fim, a opção pela utilização da transformada *wavelet* apresenta-se mais vantajosa, considerando a sua simplicidade, pequeno número de coeficientes e portanto, menor tempo de resposta.

6.3 Linhas de Transmissão com 3 Terminais

O objetivo desta Seção é apresentar os resultados obtidos pelos métodos propostos na localização de faltas em LTs com três terminais. Inicialmente serão apresentados os resultados da localização de faltas quando são utilizados dados de três terminais, método mais comumente estudado e já estabelecido na literatura especializada (Evrenosoglu, 2005).

6.3.1 Monitoração nos 3 Terminais

Como discutido na Seção 5.2, esse método é implementado em duas fases: (i) pré-localização da falta; (ii) cálculo da distância da falta.

Para avaliar a exatidão deste método considera-se a análise de uma situação específica, para um sistema modelado com três ramos, cujos comprimentos são 100 km, 140 km e 120 km, como mostrado na Figura 6.11. Inicialmente todos os ramos são modelados da mesma maneira, o que acarreta em uma atenuação por quilômetro e velocidades de propagação iguais. Uma falta fase-terra é aplicada a 40 km do terminal 2.

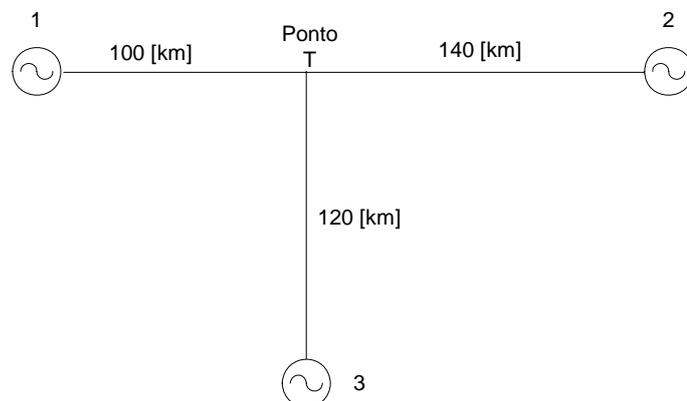


Figura 6.11 – Circuito T simulado.

A partir dos resultados fornecidos pelo ATP obtêm-se as reflexões de ondas viajantes causadas pela perturbação e medidas nos três terminais do sistema, utilizando a

abordagem já mencionada. As figuras a seguir ilustram os instantes (amostras) e as magnitudes dos coeficientes *wavelet*.

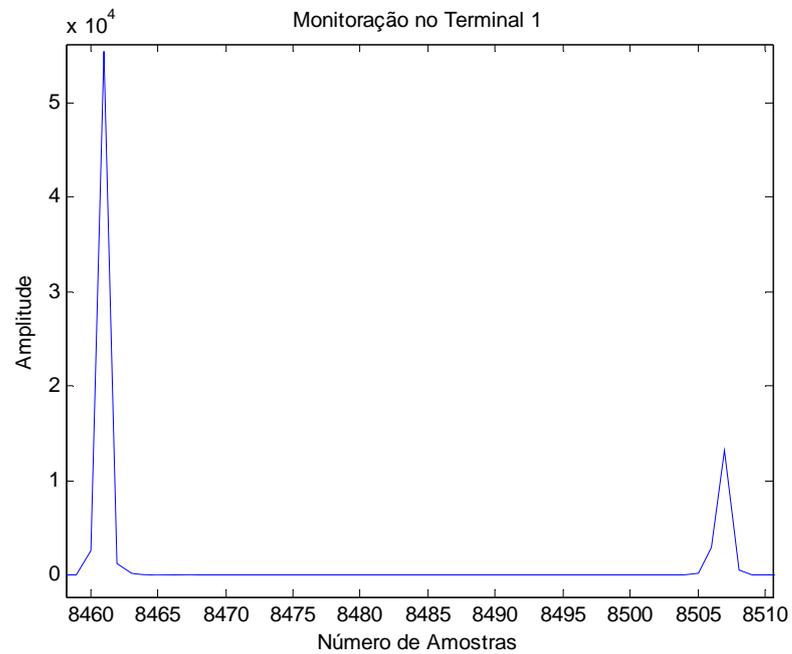


Figura 6.12 – Reflexões no terminal 1.

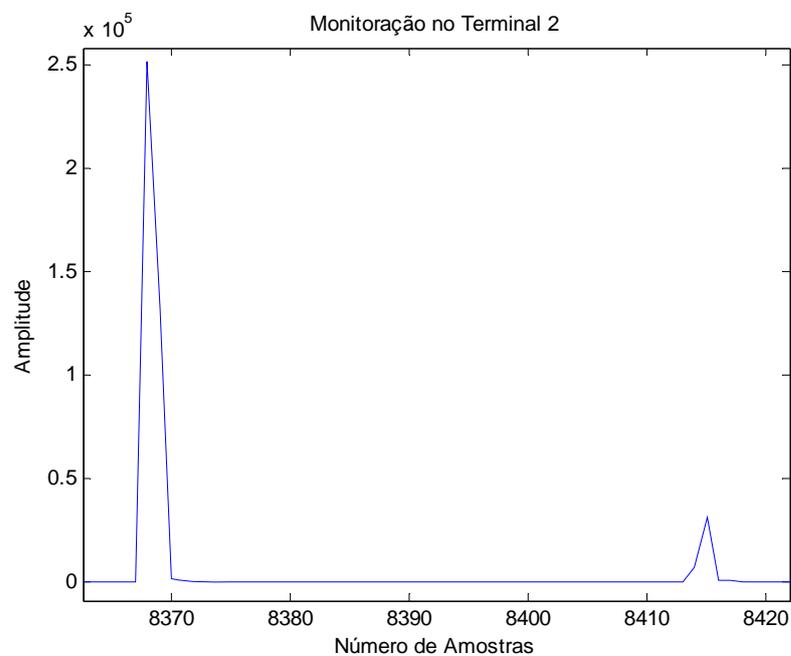


Figura 6.13 – Reflexões no terminal 2.

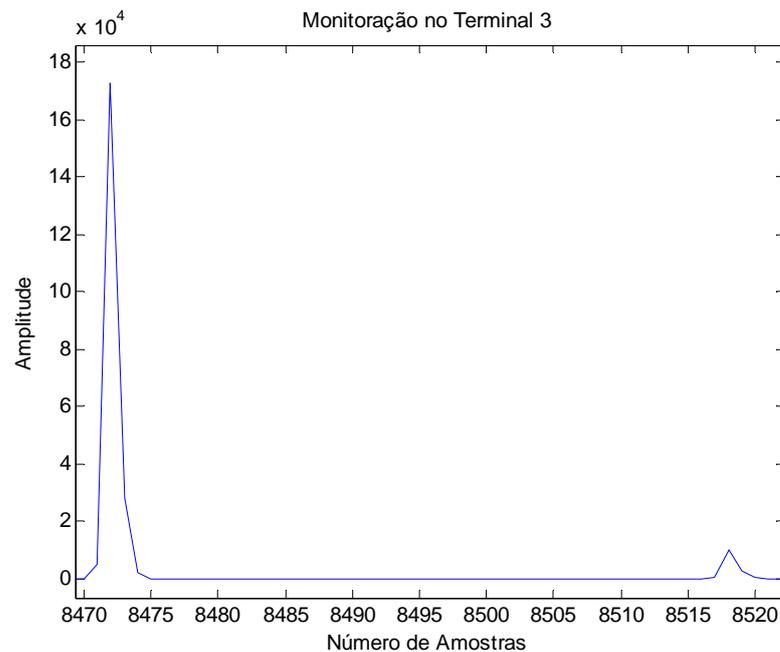


Figura 6.14 – Reflexões no terminal 3.

Pode-se observar que os picos das reflexões medidos no terminal 2 possuem magnitudes maiores do que os medidos nos outros dois terminais, indicando, dessa forma, que a falta ocorreu no ramo 2. Essa identificação, por si só, é a chamada pré-localização da falta.

Sabendo-se que a falta ocorreu no ramo 2, passa-se a utilizar apenas os dados provenientes do terminal correspondente. Os dados dos outros dois terminais são desconsiderados. Dessa forma, o intervalo de tempo entre as duas primeiras reflexões de ondas viajantes no terminal 2 é obtido. Assim, o cálculo do local de falta se procede da seguinte forma:

$$\Delta t = \frac{\Delta \text{amostras}}{\frac{fs}{2}} = \frac{47}{166500} = 0,282 \text{ ms}$$

$$d = \frac{\Delta t \cdot v_p}{2} = 39,70 \text{ km}$$

Para avaliar a resposta deste método, várias situações foram simuladas. No entanto, para efeitos práticos, a Tabela 6.14 apresenta os resultados apenas de situações que são consideradas mais relevantes.

Tabela 6.14 – Resultados do método existente.

Ramo sob falta real	Distância de falta real [km]	Ramo sob falta identificado	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	20	1	19,43	0,57
1	80	1	79,72	0,28
1	95	1	94,09	0,91
2	40	2	39,70	0,21
2	80	2	80,87	0,62
2	135	2	134,09	0,65
3	40	3	39,70	0,25
3	100	3	100,57	0,48
3	115	3	112,40	2,00

Observa-se pelos resultados mostrados na Tabela 6.14, que a identificação do ramo sob falta foi bem sucedida para todas as situações. No entanto, cabe mencionar que para faltas próximas ao ponto T a diferença entre a magnitude dos picos de reflexão (coeficientes *wavelet*) registrados no terminal do ramo sob falta e nos terminais dos ramos sadios se torna bem pequena. A atenuação do sinal aproxima-se para os três percursos das ondas viajantes. Este fato pode ser agravado quando a LT monitorada possui um ramo bem menor do que aquele sob falta, ou mesmo quando os parâmetros dos ramos são diferentes, podendo a atenuação do ramo sob falta ser maior do que a dos outros sadios.

Quanto aos valores de distância obtidos, os erros foram muito pequenos, com exceção da última situação na qual o erro alcançou 2 % ou, em valores absolutos, 2,6 km.

De qualquer modo, fica demonstrada a eficiência do método existente e, ao mesmo tempo, tem-se uma idéia de sua aplicabilidade e de suas limitações.

6.3.2 Monitoração em 2 Terminais

Como apresentado no Capítulo 5, a utilização dos registros dos três terminais de um circuito T é desnecessária. Dessa forma, utilizando-se os medidores em apenas dois terminais, pode-se localizar uma falta em qualquer ponto do sistema T. Nesse estudo os medidores estão localizados nos terminais 1 e 2 do circuito T mostrado na Figura 6.11. Teoricamente o método desenvolvido mostrou-se capaz de solucionar o problema, no entanto, faz-se necessária a avaliação deste método através de simulações computacionais cujos resultados são apresentados a seguir.

6.3.2.1 Avaliação do Método

Foram realizadas diversas simulações computacionais tanto em ambiente Matlab quanto em ATP, visando avaliar as situações possíveis, mudando o ramo sob falta, variando a distância de falta, os parâmetros e os comprimentos de cada ramo.

Inicialmente foram reproduzidas a mesmas situações simuladas na Seção 6.3.1, ou seja, com linhas de comprimentos diferentes, porém com os mesmos parâmetros por quilômetro. Como exemplo foi considerada a ocorrência da mesma falta analisada em detalhes na Seção 6.3.1, ou seja, no ramo 2 a 40 km de seu terminal.

A Figuras 6.15 e 6.16 apresentam os resultados das magnitudes e intervalos das reflexões das ondas viajantes, capturadas pela transformada *wavelet*, tanto para o modo aéreo quanto para o modo terra, nos terminais monitorados.

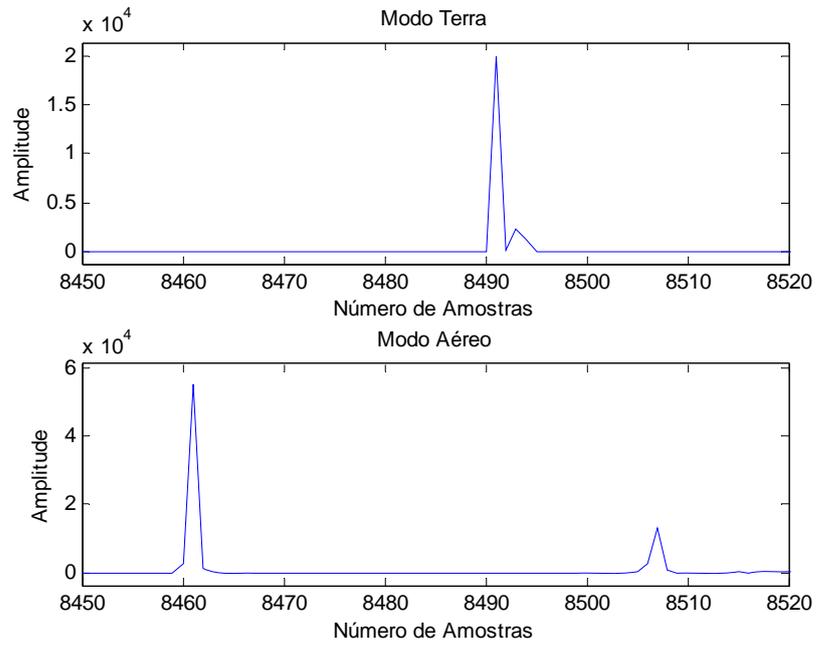


Figura 6.15 – Reflexões de modo terra e aéreo no terminal 1.

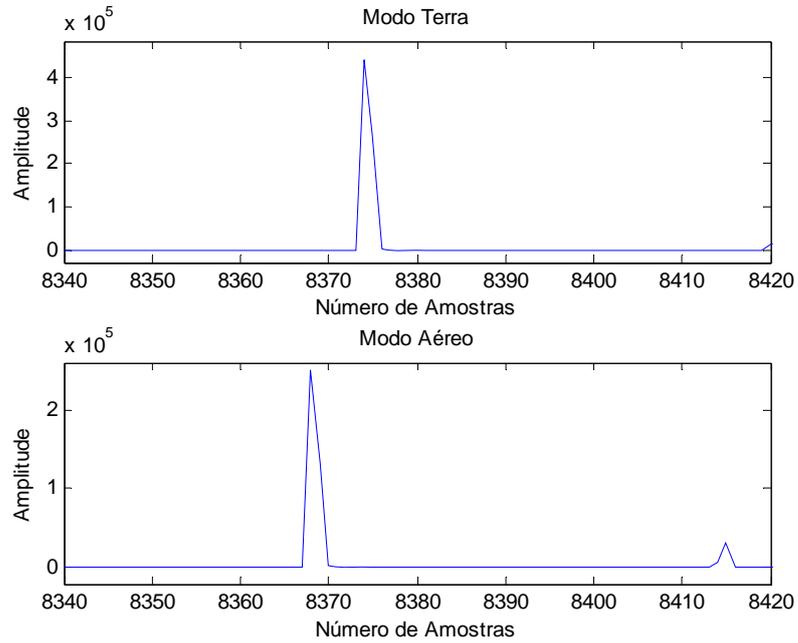


Figura 6.16 – Reflexões de modo terra e aéreo no terminal 2.

De posse do intervalo de tempo entre a primeira reflexão de modo aéreo e a primeira de modo terra, calcula-se a distância preliminar (d_{pre}) “vista” pelos dois terminais. Esse cálculo se procede de acordo com a expressão (4.9).

Como resultado tem-se d_{pre_1} igual a 201,15 km e d_{pre_2} igual a 38,93 km. Assim, sendo d_{pre_1} maior do que o comprimento do ramo 1 (100 km) e d_{pre_2} menor do que o comprimento do ramo 2 (140 km), conclui-se que o ramo sob falta é o ramo 2.

Em seguida, a distância de falta é calculada utilizando-se os registros do terminal do ramo sob falta, no caso o terminal 2. Para efetuar tal cálculo, deve-se utilizar apenas as reflexões de ondas viajantes de modo aéreo, conforme a Figura 6.17.

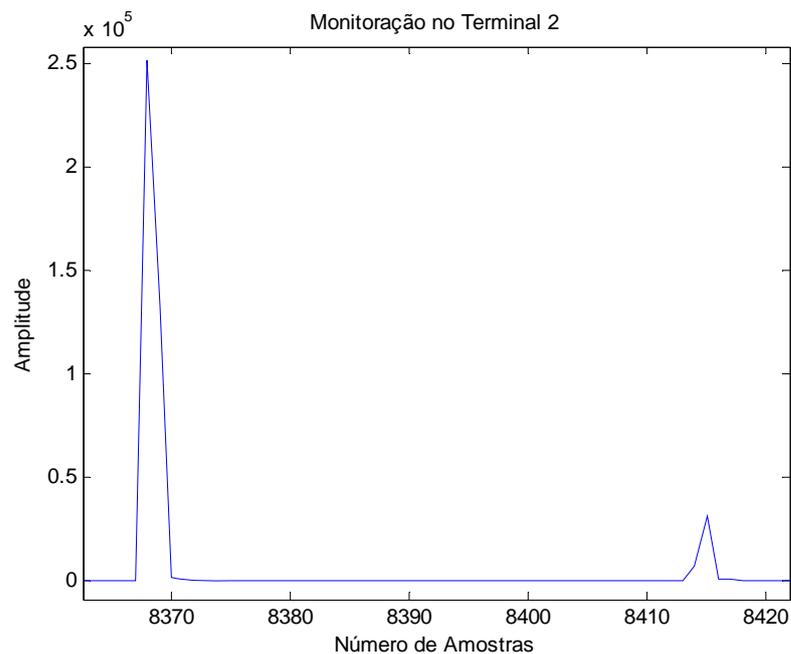


Figura 6.17 – Reflexões do modo aéreo no terminal 2.

Desta maneira, de forma análoga a Seção 6.3.1, o cálculo do local de falta se desenvolve da seguinte forma:

$$\Delta t = \frac{\Delta amostras}{\frac{fs}{2}} = \frac{47}{166500} = 0,282 \text{ ms}$$

$$d = \frac{\Delta t \cdot v_p}{2} = 39,70 \text{ km}$$

O resultado alcançado é idêntico ao da Seção 6.3.1 por se tratar da mesma condição de falta. A diferença entre os métodos está exatamente no processo de identificação do ramo sob falta.

Outra situação interessante de ser analisada é a situação de falta no ramo 3, o qual não tem monitoração no seu terminal. Seja, por exemplo, uma falta ocorrendo nesse ramo a 80 km do ponto T. Pode-se visualizar os sinais das reflexões das ondas viajantes registrados nos terminais 1 e 2, através das Figuras 6.18 e 6.19.

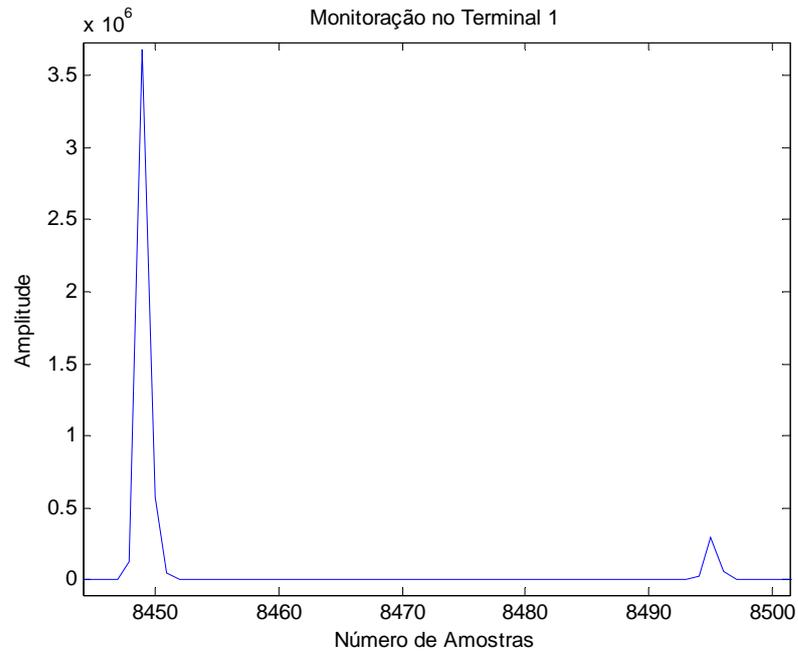


Figura 6.18 - Reflexões do modo aéreo no terminal 1.

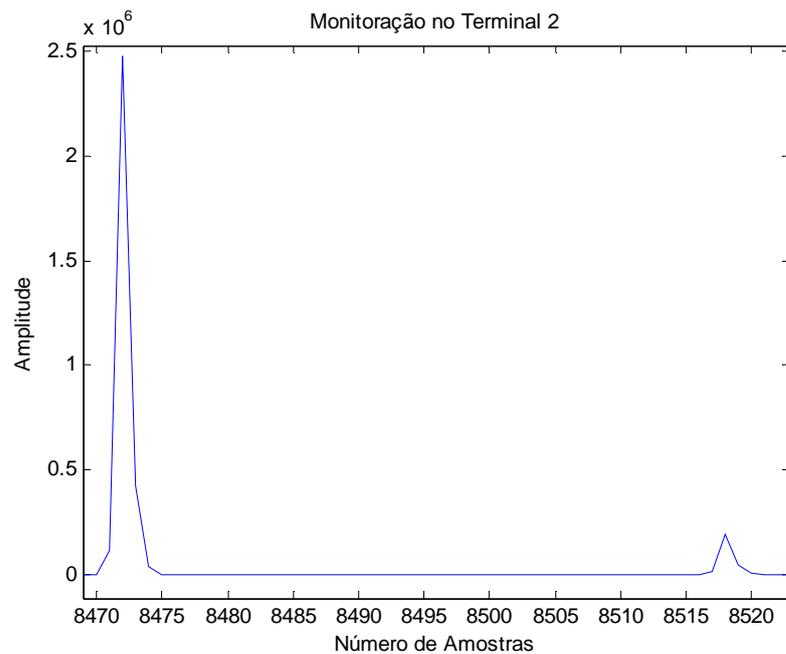


Figura 6.19 - Reflexões do modo aéreo no terminal 2.

As distâncias preliminares são então calculadas para os terminais 1 e 2:

$$d_{pre_1} = 181,67 \text{ km}$$

$$d_{pre_2} = 227,09 \text{ km}$$

Com estes resultados, conclui-se que a falta ocorreu no ramo 3, uma vez que as distâncias preliminares possuem valores maiores do que os comprimentos dos respectivos ramos. Os registros utilizados para o cálculo da distância são do terminal 1 por apresentarem magnitudes maiores do que os registros do terminal 2. Dessa maneira, o local da falta é determinado. Assim,

$$d = \frac{\Delta t_1 \cdot v_{p3}}{2} = 39,70 \text{ km}$$

Para uma melhor avaliação do método foi simulado um grande número de situações. No entanto, para efeitos práticos e comparativos, a Tabela 6.15 apresenta as mesmas situações consideradas no exemplo da Seção 6.3.1.

Tabela 6.15 – Resultados do método proposto

Ramo sob falta real	Distância de falta real [km]	d_{pre_1} [km]	d_{pre_2} [km]	Ramo sob falta identificado	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	20	19,46	227,60	1	19,43	0,57
1	80	84,35	155,72	1	79,72	0,28
1	95	97,32	142,74	1	94,09	0,91
2	40	194,65	38,93	2	39,70	0,21
2	80	155,72	84,35	2	80,87	0,62
2	135	103,81	136,25	2	134,09	0,65
3	20	116,79	162,21	3	19,43	0,48
3	80	181,67	227,09	3	81,30	0,25
3	5	103,81	149,23	3	114,09	0,76

Observa-se na Tabela 6.15 que todos os ramos foram identificados corretamente. Até mesmo para as faltas localizadas a 5 km do ponto T, o algoritmo se mostrou eficiente e se comportou de maneira segura.

Faltas localizadas a menos de 5 km do ponto T serão avaliadas na Seção 6.3.2.2.

Observa-se que os erros obtidos são pequenos e aceitáveis, sendo o maior valor encontrado igual a 0,91 %, o que, em valores absolutos, implica uma distância menor que 1 km.

Com a intenção de avaliar a robustez do método proposto, outras situações foram analisadas, tais como:

i) Variação dos comprimentos dos ramos

Foram testadas várias configurações, dentre elas, três situações específicas:

1. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 20, 140 e 120 km. A falta foi simulada no ramo 3, a uma distância de 30 km do ponto T;
2. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 20, 30 e 120 km. A falta foi simulada no ramo 3, a uma distância de 30 km do ponto T;
3. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 20, 140 e 120 km. A falta foi simulada no ramo 2, a uma distância de 120 km do terminal 2.

A Tabela 6.16 mostra os resultados obtidos.

Tabela 6.16 – Resultados de simulações variando os comprimentos dos ramos

Situação	d_{pre_1} [km]	d_{pre_2} [km]	Ramo sob falta identificado	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	58,39	168,69	3	29,56	0,37
2	58,40	64,88	3	30,41	0,34
3	45,42	123,27	2	119,63	0,19

A partir destas simulações e diversas outras realizadas, conclui-se que a variação dos comprimentos dos ramos que compõem o circuito T não influencia na identificação e nem na localização do ponto de falta.

Constata-se porém, que a existência de um ou dois ramos de comprimento muito pequeno (da ordem de 10 % do comprimento dos outros ramos) irá influenciar na determinação do intervalo de tempo entre as reflexões de modo aéreo, uma vez que o intervalo desejado pode não ser o intervalo entre os dois primeiros picos, conforme mostrado na Figura 6.20.

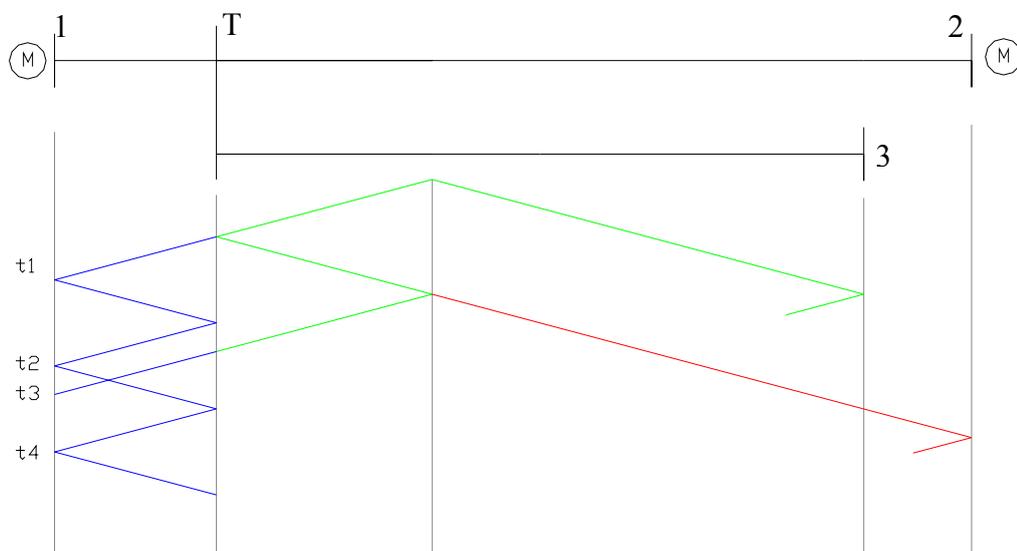


Figura 6.20 – Diagrama de Lattice.

Neste caso, o intervalo de tempo que permitiria o cálculo da distância de falta é o intervalo $t_3 - t_1$. A utilização do intervalo $t_2 - t_1$ conduziria a um valor de distância de falta incorreto. Para resolver tal problema, o algoritmo inicialmente compara a distância calculada usando o intervalo entre as duas primeiras reflexões no modo aéreo, com o comprimento do ramo em questão. Se esses dois valores forem iguais ou muito próximos, o algoritmo faz uma comparação entre as distâncias preliminares calculadas para os dois terminais monitorados e as distâncias calculadas para cada intervalo de tempo definido pelas reflexões de modo aéreo. Dessa maneira, a segunda reflexão de modo aéreo de interesse pode ser encontrada e, então, a distância da falta calculada corretamente.

ii) Variação na homogeneidade dos ramos

Um outro tipo de avaliação pertinente aos testes de eficiência do método proposto é a aplicação dos mesmos em LTs não homogêneas de três terminais. Ou seja, LTs cujos ramos possuem diferentes parâmetros por quilômetros. Tal situação, embora não muito comum, pode ser encontrada na prática. Essa não homogeneidade irá resultar em diferentes níveis de atenuação por quilômetro, bem como velocidades de propagação diferentes para cada ramo.

O sistema simulado possui os dados conforme a Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Parâmetros de modelagem dos ramos

Ramo	R_1	R_0	L_1	L_0	C_1	C_0
1	0,256184	0,58449	$1,304 \cdot 10^{-3}$	$3,713 \cdot 10^{-3}$	$9,086 \cdot 10^{-9}$	$5,176 \cdot 10^{-9}$
2	0,270121	0,60147	$1,401 \cdot 10^{-3}$	$3,902 \cdot 10^{-3}$	$8,901 \cdot 10^{-9}$	$5,014 \cdot 10^{-9}$
3	0,230231	0,56132	$1,251 \cdot 10^{-3}$	$3,650 \cdot 10^{-3}$	$9,113 \cdot 10^{-9}$	$5,216 \cdot 10^{-9}$

Para defender a aplicação do método proposto em situações deste tipo foram realizadas várias simulações na LT modelada. São mostradas aqui apenas duas situações, porém que representam com propriedade as condições desejadas:

1. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 100, 140 e 120 km. A falta foi simulada no ramo 3, a uma distância de 40 km do ponto T;
2. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 100, 140 e 120 km. A falta foi simulada no ramo 3, a uma distância de 100 km do ponto T.

Com modelagens diferentes, cada linha terá sua própria velocidade de propagação. Sendo assim, não se pode calcular diretamente a distância preliminar. É necessário primeiramente comparar o intervalo de tempo medido com o intervalo de tempo correspondente ao comprimento do ramo em questão. Assim, se ocorrer a condição da expressão (6.2), a falta estará situada no ramo n .

$$\Delta t_n \leq l_n \frac{v_{1n} - v_{0n}}{v_{1n} v_{0n}} \quad (6.2)$$

Caso seja constatado que a falta não ocorreu em um dos ramos monitorados, a distância preliminar deve ser calculada através da expressão (6.3), que é derivada desenvolvendo (6.2), aplicada aos ramos sob monitoração e sob falta.

$$d_{pre_n} = l_n + \frac{v_{1h}v_{0h}}{v_{1h} - v_{0h}} \left(\Delta t_n - l_n \frac{v_{1n} - v_{0n}}{v_{1n}v_{0n}} \right) \quad (6.3)$$

onde n indica o ramo sob monitoração e h o ramo sob falta.

Feitas tais considerações, parte-se para o cálculo da distância.

A Tabela 6.18 mostra os resultados obtidos para as simulações das duas situações do exemplo em questão.

Tabela 6.18 – Resultados de simulações mudando a homogeneidade dos ramos

Situação	d_{pre_1} [km]	d_{pre_2} [km]	Ramo sob falta identificado	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	140,48	181,65	3	38,07	1,61
2	201,93	243,10	3	99,24	0,63

Observa-se que o processo de identificação do ramo sob falta não sofre influencia dos parâmetros de modelagem das LTs.

Quanto aos valores obtidos para a distância de falta, nota-se que são diferentes dos obtidos anteriormente e mostrados na Tabela 6.15. Foram simuladas diversas outras situações nas quais, na maioria das vezes, os erros obtidos praticamente se mantiveram constantes. Conclui-se que a não homogeneidade dos ramos do circuito T não influencia demasiadamente nos resultados dos localizadores de faltas, desde que cuidados especiais sejam considerados no algoritmo, conforme discutido a seguir.

6.3.2.2 Análise das Piores Situações

Como já comentado, a velocidade de propagação no modo terra na prática não é tão precisa quanto a do modo aéreo. Dessa maneira, o cálculo da distância preliminar seria um procedimento passivo de erros. Tal fato faz com que seja necessário analisar o comportamento do algoritmo quando da ocorrência de faltas muito próximas ao ponto T. Para tanto, como exemplo, são analisadas duas situações:

1. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 100, 140 e 120 km, com falta simulada no ramo 1 a uma distância de 98 km;
2. idem ao anterior porém com falta a 99 km;

Os resultados obtidos pelas simulações destas duas situações são mostrados na Tabela 6.19.

Tabela 6.19 – Resultados de simulações para faltas próximas ao ponto T

Situação	d_{pre_1} [km]	d_{pre_2} [km]	Ramo sob falta identificado	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	97,32	149,23	1	98,31	0,31
2	103,80	142,74	3	-	-

Para a falta situada a 2 km do ponto T (situação 1) o algoritmo identificou corretamente o ramo e calculou com boa exatidão o local da falta.

No entanto, quando foi simulada uma falta a 1 km de distância do ponto T (situação 2), o algoritmo identificou erroneamente o ramo 3, pois $d_{pre_1} > l_1$ e $d_{pre_2} > l_2$. Ficou assim impossível calcular a distância de falta, uma vez que a segunda reflexão foi mascarada devido à insuficiência da taxa de amostragem.

O método existente (medição em três terminais) é capaz de identificar corretamente o ramo sob falta para esta mesma situação, apesar das magnitudes dos sinais se aproximarem bastante. No entanto, essa abordagem também não consegue obter o valor da distância em razão do mesmo problema de insuficiência da taxa de amostragem.

6.3.2.3 Eficácia e Aplicabilidade do Método

Fica evidente que a aplicação do método proposto para a localização de faltas em sistemas com três terminais é pertinente, haja vista uma economia de um terço dos equipamentos de monitoração. Além disso, os resultados das simulações computacionais mostraram bom desempenho quando comparados com os resultados obtidos pelo método existente.

A desvantagem, até então, do método proposto diz respeito àquelas faltas que ocorrem muito próximas ao ponto T. Como mostrado, o processo de identificação responde perfeitamente para faltas situadas a até 2 km do ponto T. Para faltas mais próximas o algoritmo proposto poderá identificar erroneamente o ramo sob falta. No entanto, cabe enfatizar que tal limitação pode ser contornada com taxas de amostragem mais elevadas.

6.3.3 Monitoração em 1 Terminal

Foi mostrado no Capítulo 5 a possibilidade de se localizar faltas em LTs com três terminais utilizando dados de apenas um terminal. O método desenvolvido possui bom desempenho, desde que seja respeitada a condição de comprimentos diferentes dos ramos não monitorados do circuito T.

Através de um exemplo numérico, cuja falta foi simulada a 40 km no ramo 3, foi mostrado no Capítulo 5 que o método proposto realizou a identificação do ramo sob falta com boa exatidão e retornou um valor para a distância da falta com erro de 0,2 %, ou 0,3 km.

No entanto, não é sensata a avaliação do método com base em apenas um caso simulado. Assim sendo, são realizados diversos testes através de simulações computacionais considerando as várias situações de falta.

6.3.3.1 Avaliação do Método

Para a avaliação do método proposto, pode-se lançar mão das mesmas situações simuladas nas seções 6.3.1 e 6.3.2. Dessa forma, os resultados aqui obtidos, são comparados tanto com o valor verdadeiro quanto com os resultados obtidos pelo método existente e pelo método proposto na Seção 6.3.2. Alguns dos resultados de simulações realizadas são apresentados na Tabela 6.20.

Tabela 6.20 – Resultados do método proposto

Ramo sob falta	Distância de falta real [km]	Comprimento calculado do ramo	Ramo identificado	Metade do ramo	Distância calculada [km]	Erro [%]
1	20	102,21	1	1 ^a	19,43	0,57
1	80	96,47	1	2 ^a	79,73	0,27
1	95	98,83	1	2 ^a	94,09	0,91
2	60	136,00	2	1 ^a	58,28	1,23
2	100	137,68	2	2 ^a	101,14	0,81
2	5	137,68	2	1 ^a	5,91	0,65
3	20	116,57	3	1 ^a	19,43	0,48
3	80	119,12	3	2 ^a	80,30	0,25
3	5	117,41	3	1 ^a	5,91	0,76

Observando a Tabela 6.20 é possível concluir que o método proposto se mostrou factível, tendo em vista a correta identificação dos ramos, bem como exatidão na localização de faltas. A classificação entre primeira e segunda metade do ramo sob falta se mostrou adequada. No entanto, cabe comentar que para faltas fase-terra próximas à metade do ramo, o algoritmo apresenta um maior erro da mesma maneira que qualquer dos demais algoritmos discutidos.

A exatidão na obtenção da distância da falta, em algumas situações, mostrou-se similar aos resultados obtidos pelos outros métodos apresentados.

Conclui-se, portanto, que o método proposto pode ser uma alternativa e com grande vantagem econômica na implementação. Como feito para o método anterior, este foi também aplicado para outras duas diferentes situações:

i) Variação dos comprimentos das LTs

São avaliadas aqui as mesmas situações apresentadas no item (i) da Seção 6.3.2.1. Apenas enfatiza-se que agora são utilizados os registros de apenas um dos três terminais do sistema, no caso o terminal 1.

A Tabela 6.21 mostra os resultados obtidos nas três situações apresentadas.

Tabela 6.21 – Resultados de simulações variando os comprimentos dos ramos

Situação	Comprimento do ramo calculado	Ramo identificado	Metade da linha	Distância de falta calculada [km]	Erro [%]
1	118,26	3	1 ^a	29,56	0,37
2	119,11	3	1 ^a	30,41	0,34
3	136,00	2	1 ^a	19,43	0,41

Os bons resultados obtidos (tanto de identificação do ramo quanto na localização de falta) comprovam que a influência dos comprimentos dos ramos de uma LT de três terminais pode ser contornada pelo algoritmo proposto.

ii) Variação na homogeneidade dos ramos

Uma consideração a ser feita, quando da utilização de ramos com parâmetros de modelagem diferentes, é que o terceiro instante de reflexão de interesse deve ser calculado com base na velocidade de propagação de cada ramo, de acordo com as expressões (5.5) e (5.6), para faltas que ocorrem na primeira e na segunda metade dos ramos, respectivamente.

Feito isto, o método se comporta da mesma forma. Pode-se então partir para a avaliação das mesma duas situações apresentadas no item (ii) da Seção 6.3.2.1. A Tabela 6.22 apresenta os resultados obtidos.

Aqui também a identificação do ramo sob falta foi correta; no entanto, o comprimento calculado para a situação 1 se distanciou do valor verdadeiro, ou seja 120 km.

Esse comportamento poderia resultar em um erro de identificação do ramo sob falta caso, pelo menos, um dos outros ramos tivesse comprimento próximo ao do ramo 2.

Tabela 6.22 – Resultados de simulações mudando a homogeneidade dos ramos

Situação	Distância de falta [km]	Comprimento do ramo calculado	Ramo identificado	Metade do ramo	Distância de falta calculada [km]	Erro [%]
1	40	114,20	3	1 ^a	38,07	1,61
2	100	120,25	3	2 ^a	99,24	0,63

Em relação a exatidão do local de falta, observa-se que os erros foram idênticos aos erros obtidos pelo outro método proposto (ver Tabela 6.18).

6.3.3.2 Análise das Piores Situações

Nesta Seção são apresentadas as situações mais propensas a confundirem o algoritmo de localização de falta proposto (2º método). São avaliadas inicialmente as mesmas duas situações do método anterior de acordo com o apresentado na Seção 6.3.2.2. Porém, adicionam-se agora outras duas situações nas quais os ramos da LT possuem valores de comprimentos mais próximos, de acordo com as seguintes descrições:

3. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 100, 115 e 120 km, e a falta é simulada no ramo 3 a uma distância de 30 km;
4. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 100, 115 e 120 km, e a falta é simulada no ramo 3 a uma distância de 100 km.

A Tabela 6.23 apresenta os resultados da aplicação do método proposto frente às quatro situações em questão.

Para as duas primeiras, os resultados obtidos pelo segundo método proposto são similares aos obtidos pelo primeiro método, conforme Tabela 6.19; sendo a identificação realizada de forma correta para a situação 1 e errada para a situação 2.

Tabela 6.23 - Resultados de simulações das piores situações.

Situação	Distância de falta [km]	d_{pre} [km]	Comprimento do ramo calculado	Ramo identificado	Metade do ramo	Distância de falta calculada [km]	Erro [%]
1	98	97,32	-	1	2 ^a	96,62	1,38
2	99	103,80	123,32	3	2 ^a	-	-
3	30	129,76	114,04	2	1 ^a	27,88	48,23
4	100	207,63	117,41	2	2 ^a	100,57	167,14

Para as situações 3 e 4 o processo de identificação falhou, visto que a falta foi identificada no ramo 2, quando na verdade a ocorrência deveria ser no ramo 3. Esse fato agrava o valor do erro proporcionalmente ao valor da distância da falta ao ponto T. Em outras palavras, quanto mais a falta for distante do ponto T maior será o erro com relação à distância verdadeira.

Desta forma, para a aplicação do método em questão, teriam que ser definidos limites mínimos de diferenças entre os comprimentos dos ramos não monitorados. Tal definição seria possível apenas de maneira experimental, ou seja, através de realização exaustiva de simulações computacionais.

6.3.3.3 Eficácia e Aplicabilidade do Método

Quando se olha o aspecto econômico, a aplicação do segundo método proposto é vantajosa, haja vista a redução no investimento em equipamentos de monitoração. Também quando se observa a exatidão obtida pelo método, os resultados, para a maioria das situações simuladas, se mostraram aceitáveis, tanto em comparação com o valor verdadeiro de distância de falta quanto em comparação aos resultados obtidos pelo método existente e pelo primeiro método proposto. No entanto, deve-se fazer a ressalva de que a aplicação só é possível quando a LT possuir ramos não monitorados de comprimentos diferentes. Essa é uma limitação do método proposto. Além do mais, para a identificação segura do ramo sob falta, deve-se considerar uma margem de segurança para a diferença de comprimentos entre os mesmos.

Pode-se concluir que o método proposto apresenta-se mais vantajoso frente ao método existente, visto que a consideração de diferentes comprimentos é uma condição plausível.

6.3.4 Comparação Entre os Métodos

Pode-se dizer que cada um dos métodos possui vantagens e desvantagens. É necessário avaliar a adequação deles para cada tipo de aplicação, ou seja, a opção de se utilizar um dos métodos deve ser feita com base nas necessidades e disponibilidades econômicas e técnicas.

Em primeiro lugar, é importante observar que a exatidão obtida para os três métodos foi satisfatória. Dessa maneira, uma falta pode ser localizada em um sistema de três terminais, com aceitável exatidão, independente do método escolhido.

Uma comparação entre os erros encontrados para a simulação de cada situação apresentada, para o método existente, na Tabela 6.14 é mostrada na Figura 6.21. As mesmas situações também foram apresentadas para o primeiro método proposto (Tabela 6.15) e para o segundo método proposto (Tabela 6.20).

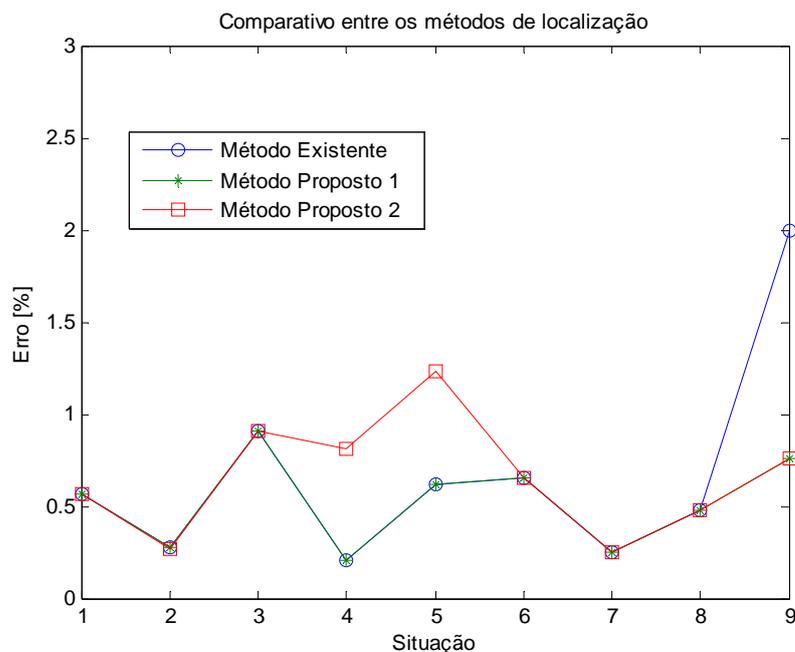


Figura 6.21 – Comparação de erros.

Pode-se observar que a maioria dos erros encontrados para os três métodos ficou abaixo de 1,0 %. No entanto, pode-se notar que para algumas situações em particular, o erro obtido foi um pouco maior. Para o método existente, obteve-se um erro de 2,0 % para a situação 9, na qual a falta ocorreu no ramo 3 a 115 km de seu terminal. Já para o método proposto 2, as situações 4 e 5 obtiveram um erro um pouco maior do que o obtido pelos outros dois métodos.

O que diferencia os métodos entre si é o processo de identificação do ramo sob falta. Para todos os casos simulados, o método existente conseguiu identificar corretamente o ramo sob falta.

No caso dos métodos propostos nem toda identificação foi bem sucedida. Em algumas situações bem particulares, os algoritmos se confundiram e acabaram por identificar o ramo de forma incorreta, conduzindo, portanto, a valores errados de distância de falta. Cabe enfatizar que tais situações representam uma parcela reduzida das situações possíveis, ou seja, a probabilidade de ocorrência das mesmas é bem pequena, como já comentado.

6.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados diversos resultados obtidos por algoritmos de localização de faltas baseados em ondas viajantes e transformada *wavelet*.

Foram avaliados:

- aplicação da abordagem de ondas viajantes em LTs de dois terminais;
- método existente aplicado a LTs de três terminais;
- método proposto 1 (dados de dois terminais) aplicado a LTs de três terminais;
- método proposto 2 (dados de um terminal) aplicado a LTs de três terminais.

Em diferentes situações avaliadas os métodos propostos se comportam dentro da média quando comparados aos resultados obtidos com o método existente.

Por fim, deve-se enfatizar mais uma vez os aspectos econômicos, ou seja: o custo do método existente é maior que o custo do primeiro método proposto que, por sua vez, é maior do que o custo do segundo método proposto.

Capítulo 7

Conclusões

*“Mas se responder não pude
à pergunta que fazia,
ela, a vida, a respondeu
com sua presença viva.
E não há melhor resposta
que o espetáculo da vida:
vê-la desfiar seu fio,
que também se chama vida,
ver a fábrica que ela mesma,
teimosamente, se fabrica,
vê-la brotar como há pouco
em nova vida explodida;
mesmo quando é assim pequena
a explosão, como a ocorrida;
como a de há pouco, franzina;
mesmo quando é a explosão
de uma vida Severina.”*

João Cabral de Melo Neto

7.1 Conclusões e Contribuições

Neste trabalho de dissertação de mestrado foram propostos dois métodos de localização de faltas em LTs de três terminais. O primeiro baseando-se nos registros de tensões de dois terminais e o segundo apenas nos registros de um terminal.

Ambos os métodos foram avaliados através de simulações computacionais tanto em ambiente Matlab quanto em ambiente ATP. Foram simuladas diversas situações com o intuito de se obter conclusões sobre a aplicabilidade e eficácia de cada método.

Os erros encontrados demonstram a factibilidade de utilização dos dois métodos propostos como alternativa ao método existente que utiliza dados medidos nos três terminais da LT.

Comparando os dois métodos, o primeiro mostrou possuir um procedimento de identificação do ramo sob falta mais confiável do que o segundo. Por outro lado, o segundo, apesar de menos robusto, representa uma grande economia de equipamentos de monitoração, uma vez que necessita de dados de apenas um terminal.

Uma vez que a identificação foi executada de forma correta, os dois métodos apresentam uma satisfatória exatidão no cálculo da distância de falta, comparável à do método existente.

Os dois métodos propostos, bem como suas avaliações frente a simulações computacionais, trazem contribuições científicas que certamente podem ser adicionadas àquelas já apresentadas na literatura especializada.

Estas razões se refletem na aceitação de dois trabalhos técnicos a serem apresentados no XII ERIAC (Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ) e um no IPST 2007 (*The 7th International Conference on Power Systems Transients*), respectivamente intitulados:

- Avaliação da Exatidão na Localização de Faltas Fase-Terra através de Algoritmos Baseados na Teoria de Ondas Viajantes;
- Comparação dos Métodos de Localização de Falta Baseados na Teoria de Ondas Viajantes e na Medição Fasorial Sincronizada;
- *Optimization of the Fault Location Method in Transmission Lines Based on Travelling Waves Theory and in the Measurement Phasor Synchronized.*

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a continuação dos estudos de avaliação de parâmetros de influência no cálculo da distância de falta, sugerem-se as seguintes situações:

- aprimoramento do algoritmo de localização de faltas baseado na teoria das ondas viajantes para faltas muito próximas às extremidades da LT;
- variação da frequência de amostragem. Otimizar o valor da taxa de amostragem necessária para o bom funcionamento do método;
- substituição da transformada *wavelet* por filtros digitais, quando da análise de sinais com diferentes níveis de razão sinal ruído;
- substituição dos componentes de modos aéreos e terra pelos componentes de seqüências positiva, negativa e zero.

Paralelamente, analisando a proposição dos métodos para a localização de faltas em sistemas com três terminais, pode-se fazer as seguintes sugestões:

- avaliar a resposta dos métodos quando da utilização dos mais diversos tipos de *wavelets* mãe. Aprimoramento do método para encontrar o tipo de *wavelet* mãe que mais seja apropriado à aplicação de cada método proposto;
- buscar soluções para generalizar a utilização do método que utiliza dados de apenas um terminal, independente dos comprimentos das LTs. Eliminar a necessidade de que as LTs possuam comprimentos diferentes;
- aplicação dos métodos propostos em outros tipos de linhas de transmissão de maior complexidade operativa, como são os casos de linhas paralelas e linhas com compensação série.

A realização das sugestões de melhorias citadas acima, certamente representará novas contribuições científicas para um assunto que ainda necessita de soluções e aprimoramento em diversos aspectos.

Referências Bibliográficas

“Assim, eu me vejo condenado à morte por vós; vós, condenados de verdade, criminosos de improbidade e de injustiça. Eu estou dentro da minha pena, vós dentro da vossa. E talvez essas coisas devessem acontecer mesmo assim”

Sócrates

AGGARWAL, R. K.; COURY, D. V.; JOHNS, A. T.; KALAM, A.. *A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993.

BONEVILLE POWER ADMINISTRATION. *ATP Rule Book*. LEC, July, 1987.

BENTLEY, P. M.; McDonnell, J. T. E. *Wavelets Transforms: An Introduction*. Electronics & Communication Engineering Journal. August, 1994.

BHUNIA, S.; ROY, K.; SEGURA, J. *A novel Wavelet Transform Based Transient Current Analysis for Fault Detection and Localization*. DAC2002, June 10-14, 2002, New Orleans, Louisiana, USA.

BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO H. *Introduction to Wavelets and Wavelets Transforms – A primer*. 10 ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1998.

CASTELLANOS, F., MARTI, J. R. *Full Frequency-Dependent Phase-Domain Transmission Line Model*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 12, No 3, August 1997, p. 1331-1339.

COHEN, L.; KOVACEVIC, J. *Time-Frequency Distributions – A Review*. Proceedings of IEEE, New York, v. 77, n. 7, p. 941-981, July 1989.

DAUBECHIES, I. *Orthonormal Bases of Wavelets with Finite Support – Connection with Discrete Filters*. In: International Conference on Time-Frequency Methods and Phase Space (December 1987, Marseille, France). Proceedings. Marseille, 1987. p. 38-66.

DAUBECHIES, I. *The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis*. IEEE Transactions on Information Theory, New York, v. 36, n. 5, p. 961-10005, July 1990.

DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelet*. (SIAM). 5. ed. Montpellier: Capital City Press, 1997.

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

EVRENOSOGLU, C. Y.; ABUR, A. *Travelling Wave Based Fault Location for Teed Circuits*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

FUCHS, R. D. *Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), Itajubá, 1973.

- 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, Vol. 7, No. 1, January 1992.
- GRAPS, A. *An Introduction to Wavelets*. IEEE Computational Science & Engineering. 1995.
- GRAPS, A. *Amara's Wavelet Page*. <http://amara.com/current/wavelet.html>. 1995.
- HEDMAN, D. E. *Propagation on Overhead Transmission Lines – Theory of Modal Analysis*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, v. 84, September 1965, p. 762-771.
- JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. *Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform*. IEEE, 1998.
- Kaiser, G. *A Friendly Guide to Wavelets*. 9 ed. Woodbine, NJ: Birkhauser, 1994.
- LAI, L. L.; VASEEKAR, E.; SUBASINGHE, H.; RAJKUMAR, N.; CARTER, A.; GWYN, B. J.. *Application of Wavelet Transform and Neural Networks to Fault Location of a Teed Circuit*. Institute of Electrical Engineers, Savoy Place, London, UK, 2000.
- LIN, Y. H.; LIU, C. W.; YU, C.S.. *A New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines – Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current Phasors*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002.
- MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. *Fault Location Using Wavelets*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998.
- MAKMIMG, P.; BUNJONGJIT, S.; KUNAKORN, A.; JIRIWIBHAKORN, S.; KANDO, M. *Fault Diagnosis in Transmission Lines Using Wavelet Transform Analysis*. IEEE, 2002.
- MALLAT, S. A. *Theory Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, New York, v. 11, n. 7, p. 674-693, July 1989.
- MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J. M. *Wavelet Toolbox – User's Guide*. The MathWorks. July, 2002.
- NYQUIST, H. *Certain Topics in Telegraph Transmission Theory*, AIEE Transactions, 1928, p. 617-644.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. 20 ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.

- PIRES, R. C. *Compensação Não- Convencional de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), 1989.
- SERRANO, E. P.; FABIO, M. A. *Undecimated Wavelet Transform from Orthogonal Spline Wavelets*. In: D'ATTELIS, C. E.; FERNÁNDEZ-BERDAGUER, E. M. *Wavelet Theory and Harmonic Analysis in Applied Sciences*. 9 ed., Boston: Birkhauser, 1997. p. 33-68.
- SILVEIRA, P. M. *Identificação e Localização de Faltas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Agosto, 2001.
- SILVEIRA, P. M., SEARA, R., ZÜRN, H. H.. *Localização de Faltas por Ondas Viajantes – Uma Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet*. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, 2001.
- SILVEIRA, P. M., SEARA, R., ZÜRN H. H.. *Seleção de Fases em Relés Numéricos de Linhas de Transmissão Baseada Em Análise Multi-Resolução via Transformada Wavelet*. Revista Controle & Automação, Vol. 13, no. 3, Set., Out., Nov. E Dezembro 2002.
- VETTERLI, M.; HERLEY, C. *Wavelet and Filter Banks: Theory and Design*. IEEE Transactions on Signal Processing, New York, v. 40, n. 9, p. 2007-2232, September 1992.
- WICKERHAUSER, M. V. *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*. 10. ed. Wellesley: A K Peters Ltd., 1994, p. 24-25.
- WHITE, S. *Digital Signal Processing: A Filtering Approach*. 10. ed. Delmar Learning, 256 pages, March 2000.
- YI-ZHUANG, H.; XIAOLIN, Q.; MINGCHAO, X. *A New Fault Location Method*. IEEE, 2002.

“É uma enorme dor perceber que, mesmo que passe a vida inteira a estudar, serei sempre ignorante. No entanto, me conforto em compreender que a total ciência seria insuportável para qualquer ser humano, tanto que a continuidade da vida seria impossível.”

Marcel Parentoni