

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet

Flávio Bezerra Costa

Campina Grande - Paraíba - Brasil
© Flávio Bezerra Costa, Agosto de 2006

Flávio Bezerra Costa

Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet

Dissertação de mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.

Orientador

Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.

Orientadora

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Agosto de 2006



C837d Costa, Flavio Bezerra
Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão baseadas na transformada wavelet / Flavio Bezerra Costa. - Campina Grande, 2006.
98 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Eletrica e Informatica.

1. Linhas de Transmissão 2. Transformada Wavelet 3. Detecção e Classificação de Faltas 4. Dissertação I. Souza, Benemar Alencar de, Dr. II. Brito, Nubia Silva Dantas, Dra. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.317.35(043)

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
BASEADAS NA TRANSFORMADA WAVELET**

FLÁVIO BEZERRA COSTA

Dissertação Aprovada em 31.08.2006



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Orientador



NÚBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Orientadora



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Componente da Banca



FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
AGOSTO - 2006

*Em memória a Givaldo Lúcio Bezerra.
1954-1979.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS pela ajuda em todos os momentos da minha vida e pela força e coragem para vencer todos os obstáculos. A Ele sou eternamente grato.

À Lucilene L. Goes pelo grande incentivo em todos os momentos que passamos juntos, se mostrando uma companheira de grande valor. Também por sempre acreditar em meu potencial.

Aos meus pais, Francisco e Genilda, e aos meus avós, Geraldo e Maria Lúcia pelo grande incentivo nessa caminhada. Aos meus irmãos Geraldo, Fabiano e Fabiana, e aos meus tios Marcone, Marinaldo e Rosinaldo, e a todos de minha família que tiveram grande contribuição na minha formação pessoal.

Aos professores Benemar Alencar e Núbia Brito pela orientação necessária ao desenvolvimento desta dissertação e pela contribuição em minha formação acadêmica e profissional.

Aos amigos de trabalho Alessandro, José Antônio, Antônio Carlos, Ricardo e George, pela participação indireta no desenvolvimento dessa pesquisa e aos amigos Kleber e Karcus sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Aos amigos de infância Waldemir, Fernando, Erivaldo, José Laudelino, Nélcio, Eduardo, José Pereira e Alexandre pela amizade cultivada durante tanto tempo.

Aos engenheiros da CHESF Sandra Sayonara, Sergio Caupone, José Horácio e Milde Lira, pelos incansáveis esforços no desenvolvimento do projeto de P&D que originou esta dissertação.

Agradeço ainda a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram na realização deste trabalho.

Flávio Bezerra Costa

RESUMO

Propõe-se nesta dissertação um método baseado na transformada wavelet discreta para detecção, delimitação da duração e classificação de faltas em linhas de transmissão. A detecção da falta é realizada por um conjunto de regras construído a partir da análise da energia dos coeficientes wavelet das correntes de fase. As regras para determinar a duração da falta são baseadas na análise dos coeficientes wavelet das correntes de fase e de neutro. A classificação da falta é realizada através da energia concentrada dos coeficientes wavelet das correntes de fase e neutro, durante o instante de falta. Uma falta é diferenciada dos distúrbios associados à qualidade da energia elétrica, tais como afundamentos de tensão e transitórios oscilatórios. O método foi avaliado considerando registros oscilográficos reais capturados pelos registradores digitais de perturbação em diversas linhas do sistema de transmissão da CHESF, apresentando bons resultados.

Palavras-chave: Detecção e classificação de faltas; linhas de transmissão; transformada wavelet.

ABSTRACT

This dissertation presents a method based on discrete wavelet transform for fault detection, clearing time identification and classification in transmission lines. The fault detection is accomplished by rules based on wavelet coefficients energy of the phase currents. The fault clearing time identification is carried out by wavelet coefficients analysis of the neutral and phase currents. The fault classification rules are based on wavelet coefficients energy of the neutral and phase currents obtained in fault clearing time. A fault is differentiated from power quality disturbances such as voltage sags and oscillatory transients. The method has been evaluated for real records obtained in various transmission lines of CHESF's transmission system and good results were obtained.

Keywords: Fault detection and classification; transmission lines; wavelet transform.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Glossário	xx
Capítulo 1– Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2– Revisão Bibliográfica	4
Capítulo 3– Fundamentação Teórica	10
3.1 Transformada Wavelet	10
3.1.1 A Transformada Wavelet Contínua	10
3.1.2 Banco de Filtros e a Transformada Wavelet Discreta	13
3.1.3 A Transformada Wavelet Discreta Inversa	17
3.1.4 Energia dos Coeficientes Wavelet	18

Capítulo 4– Distúrbios em Sistemas de Transmissão	19
4.1 Transitórios	19
4.1.1 Transitórios Impulsivos	20
4.1.2 Transitórios Oscilatórios	20
4.2 Faltas em Linhas de Transmissão	21
4.3 Variações de Tensão de Curta Duração	24
4.3.1 Interrupção	25
4.3.2 Elevação de tensão	25
4.3.3 Afundamento de tensão	26
4.4 Energizações de Linhas de Transmissão	26
4.5 Religamentos de Linhas de Transmissão	31
4.6 Desligamentos de Linhas de Transmissão	32
4.7 Considerações Finais	35
Capítulo 5– Método Proposto	36
5.1 Módulo de Detecção de Faltas	36
5.1.1 Normalização dos Sinais de Tensão e Corrente	37
5.1.2 Aplicação da TWD	38
5.1.3 Energia Janelada dos Coeficientes Wavelet	38
5.1.4 Elaboração das Regras de Detecção de Faltas	40
5.1.4.1 Registros Oscilográficos sem Distúrbios	40
5.1.4.2 Influência dos Transitórios Oscilatórios na Energia Janelada	41
5.1.4.3 Variáveis Usadas na Detecção de Faltas	42
5.1.4.4 O Critério do Valor Máximo de Energia	43
5.1.4.5 O Critério da Variação Brusca de Energia	44
5.1.4.6 O Critério da Duração Mínima e da Energia Pós-distúrbio	44

5.1.4.7	Sumário do Método Proposto	45
5.1.5	Estimação das Variáveis de Detecção	46
5.1.5.1	Registros Oscilográficos Reais	46
5.1.5.2	Registros Oscilográficos Simulados	46
5.1.5.3	Estimação dos Limiares de Energia E_1 e E_2	47
5.1.5.4	Estimação da Variação Mínima de Energia ΔE_{min}	48
5.2	Módulo de Delimitação do Intervalo de Falta	50
5.2.1	Filtragem dos Coeficientes Wavelet	51
5.2.2	Transitórios nas Tensões e Correntes	53
5.2.3	Escolha das Correntes	56
5.2.4	Escolha da Escala Wavelet	57
5.2.5	Escala Wavelet versus Frequência	60
5.2.6	Sumário do Método Proposto	61
5.2.7	Estimação das Variáveis de Delimitação do Intervalo de Faltas	62
5.3	Módulo de Classificação de Faltas	64
5.3.1	Energia Concentrada no Intervalo de Falta	66
5.3.2	Sumário do Método Proposto	66
5.3.3	Estimação das Variáveis de Classificação	68
5.3.3.1	Registros Oscilográficos Simulados	68
5.3.3.2	Escala Wavelet Analisada e Estimação dos Limiares de Energia λ_{EF} e λ_{EN}	68
Capítulo 6– Avaliação do Método Proposto		70
6.1	Registros Oscilográficos Reais Padrões	71
6.2	Registros Oscilográficos Reais com Erros na Aquisição dos Dados	72
6.3	Estudo de Caso	75

<i>SUMÁRIO</i>	x
Capítulo 7– Conclusões	81
Referências Bibliográficas	82
Apêndice A– Rede Oscilográfica da CHESF	88
Apêndice B– Padrão COMTRADE	90
Apêndice C– Sistema Wavan[©]	93
Apêndice D– Sistema de Transmissão da CHESF	95
Apêndice E– Publicações em Eventos	97

LISTA DE FIGURAS

3.1	Wavelet mãe Daubechies 4.	11
3.2	Wavelets filhas obtidas da wavelet mãe Daubechies 4 através de uma operação de: (a) escalonamento; (b) translação.	11
3.3	Cálculo do coeficiente wavelet.	11
3.4	Translação da wavelet.	12
3.5	Escalação da wavelet.	12
3.6	Bloco da TWD.	15
3.7	Sinal original.	15
3.8	Componentes do sinal original após aplicação de um estágio da TWD: (a) coeficientes de aproximação; (b) coeficientes wavelet.	15
3.9	Três estágios da TWD.	16
3.10	Três estágios da TWD inversa.	18
4.1	Registro oscilográfico com transitórios oscilatórios: (a) tensões; (b) correntes. . .	21
4.2	Falta monofásica na fase B: (a) tensões; (b) correntes.	22
4.3	Influência da localização: (a) 1 km; (b) 100 km.	23
4.4	Influência do ângulo de incidência: (a) 30°; (b) 80°.	24
4.5	Influência da resistência de falta: (a) 1 Ω ; (b) 100 Ω	24
4.6	Registro oscilográfico com falta monofásica na fase B: (a) tensões; (b) correntes.	27
4.7	Registro oscilográfico com afundamento de tensão devido a uma falta em LT paralela: (a) tensões; (b) correntes.	27

4.8	Representação de uma LT com os terminais em aberto.	28
4.9	Energização de uma LT com um terminal em aberto: (a) E_{LRa} ; (b) E_{RLa}	29
4.10	Energização de uma LT com um terminal energizado: (a) E_{RLf} ; (b) E_{LRf}	31
4.11	Registro oscilográfico contemplando uma falta bifásica seguido pelo religamento da LT: (a) tensões; (b) correntes.	32
4.12	Desligamento de uma LT com um terminal energizado: (a) D_{RLf} ; (b) D_{LRf}	33
4.13	Desligamento de uma LT com um terminal em aberto: (a) D_{LRa} ; (b) D_{RLa}	34
5.1	Diagrama simplificado do método proposto.	36
5.2	Processo de janelamento: (a) sinal original; (b) coeficientes wavelet; (c) energia janelada.	39
5.3	Correntes de fase de um registro oscilográfico sem distúrbios.	40
5.4	Energia janelada dos coeficientes wavelet, na primeira escala, para cada corrente.	40
5.5	Energia janelada dos coeficientes wavelet das correntes, na primeira escala: (a) transitórios de chaveamento; (b) falta BT; (c) afundamento de tensão; (d) energização E_{LRa}	41
5.6	Parâmetros para a detecção de distúrbios.	42
5.7	Registro oscilográfico, sem distúrbios, coletado em uma LT com o terminal remoto em aberto: (a) tensões; (b) correntes.	43
5.8	Energia janelada dos coeficientes wavelet, na primeira escala, para cada corrente.	43
5.9	Diagrama unifilar simplificado do trecho do subsistema Leste de transmissão da CHESF.	47
5.10	Histograma de energia para as correntes sem distúrbio: (a) energia mínima; (b) energia máxima.	48
5.11	Histograma para a maior variação de energia dos registros com: (a) transitórios de chaveamento; (b) falta; (c) afundamento de tensão.	49
5.12	Registro real com a indicação das etapas de pré-falta, falta e pós-falta.	50

5.13	Sinal de corrente na fase B em uma falta monofásica do tipo BT.	52
5.14	Coeficientes wavelet, na primeira escala: (a) antes da filtragem; (b) filtrado com $U = 0,15$; (c) filtrado com $U = 0,30$	52
5.15	Falta monofásica na fase A: (a) tensões no domínio do tempo; (b) coeficientes wavelet.	53
5.16	Coeficientes wavelet das tensões, na primeira escala, após a etapa de filtragem com $U = 0,15$	54
5.17	Falta monofásica na fase A: (a) correntes no domínio do tempo; (b) coeficientes wavelet.	55
5.18	Coeficientes wavelet das correntes, na primeira escala, após a etapa de filtragem com $U = 0,15$	55
5.19	Oscilações de alta frequência nas correntes de falta antes e após a falta.	58
5.20	Corrente de falta com oscilações de alta frequência antes e após a falta.	59
5.21	Influência das oscilações de alta frequência pré- e pós-falta: (a) escala 1; (b) escala 2.	59
5.22	Escala wavelet versus frequência.	61
5.23	Correntes de uma falta monofásica na fase A.	64
5.24	Energia janelada dos coeficientes wavelet das correntes de um registro oscilográfico com falta, na escala: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5.	65
5.25	Taxa de acerto percentual versus: (a) λ_{EF} ; (b) λ_{EN}	69
6.1	Registro oscilográfico com erros na aquisição de dados: (a) tensões; (b) correntes.	70
6.2	Corrente na fase A de um registro com erros na aquisição de dados.	73
6.3	Energia janelada dos coeficientes wavelet, na primeira escala, para a corrente na fase A.	73
6.4	Registro oscilográfico com erros na aquisição dos dados: (a) tensões; (b) correntes.	74
6.5	Diagrama unifilar simplificado do trecho do subsistema leste de transmissão da CHESF, ao qual pertence a LT 05L9.	75

6.6	Registro oscilográfico com falta coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.	76
6.7	Registro com afundamento de tensão coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.	76
6.8	Registro com energização coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.	79
6.9	Registro com variação de carga coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.	79
6.10	Registro oscilográfico atípico com falta: (a) tensões; (b) correntes.	80
A.1	Rede de oscilografia.	88
C.1	Diagrama simplificado de integração do Wavan [©] ao sistema de monitoramento de uma linha de transmissão.	94
D.1	Diagrama unifilar do sistema de transmissão da CHESF.	96

LISTA DE TABELAS

2.1	Resumo da revisão bibliográfica referente ao diagnóstico de falta.	9
2.2	Resumo da revisão bibliográfica referente à análise de distúrbios de QEE.	9
4.1	Categorias e características dos transitórios em sistemas elétricos de potência. . .	20
4.2	Faltas ocorridas no sistema de transmissão da CHESF no período de 2003 a 2004.	22
4.3	Categorias e características das variações de tensão de curta duração em sistemas elétricos de potência.	25
5.1	Tipo e quantidade de registros avaliados para a elaboração das regras.	46
5.2	Variáveis utilizadas na simulação das faltas.	47
5.3	Variação máxima de energia nos registros oscilográficos avaliados.	49
5.4	Desempenho do método de delimitação do intervalo de falta em diversas escalas.	63
5.5	Espectro de frequência das escalas escolhidas conforme a frequência de amostragem.	63
5.6	Esquema de codificação utilizada para a classificação de faltas.	66
5.7	Variáveis de simulação usadas na simulação digital.	68
5.8	Limiares de energia λ_{EP} e λ_{EN} que promovem a melhor taxa de acerto.	69
6.1	Resultados da detecção de faltas em registros oscilográficos reais.	71
6.2	Resultados da classificação de faltas em registros oscilográficos reais.	71
6.3	Resultados da delimitação do intervalo de faltas em registros oscilográficos reais.	72
6.4	Resultados da detecção de faltas em registros reais com erros na aquisição dos dados.	74

6.5	Registros obtidos nas LT 05L9, 05L8, 05L5 e 05L7 em 28 de janeiro de 2005. . .	77
B.1	Tipos de arquivos do padrão COMTRADE.	90
B.2	Registros e campos dos arquivos de configuração.	92
D.1	Nível de tensão das linhas de transmissão.	95

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Fator escala.
- b - Fator translação.
- C_ψ - Constante de admissibilidade.
- $c_j(k)$ - Coeficientes de aproximação da escala j .
- $c_0(k)$ - Sinal original.
- $d_j(k)$ - Coeficientes wavelet da escala j .
- $\hat{d}_j(k)$ - Coeficientes wavelet da escala j após o processo de filtragem.
- $e|_{k_1}^{k_2}$ - Energia concentrada dos coeficientes wavelet da amostra k_1 a k_2 .
- $\mathcal{E}_j(k)$ - Energia janelada dos coeficientes wavelet da escala j .
- $\mathcal{E}_A(k)$ - Energia janelada dos coeficientes wavelet, da primeira escala, para a corrente na fase A.
- $\mathcal{E}_B(k)$ - Energia janelada dos coeficientes wavelet, da primeira escala, para a corrente na fase B.
- $\mathcal{E}_C(k)$ - Energia janelada dos coeficientes wavelet, da primeira escala, para a corrente na fase C.
- E_1 - Limiar de energia que delimita a região que contempla os pontos de energia referentes ao regime permanente.
- E_2 - Limiar de energia que delimita a região que contempla os pontos de energia referentes ao regime permanente.
- E_A - Energia concentrada dos coeficientes wavelet da corrente na fase A durante o período de falta.
- E_B - Energia concentrada dos coeficientes wavelet da corrente na fase B durante o período de falta.

- E_C - Energia concentrada dos coeficientes wavelet da corrente na fase C durante o período de falta.
- E_{max} - Maior valor de energia durante o distúrbio.
- E_{pos} - Energia média num ciclo, calculada imediatamente após o distúrbio.
- f_s - Frequência de amostragem.
- $g(k)$ - Filtro passa-faixa.
- $h(k)$ - Filtro passa-baixa.
- k_1 - Amostra relacionada ao instante inicial do distúrbio.
- k_2 - Amostra relacionada ao instante final do distúrbio.
- k_i - Amostra relacionada ao instante inicial da falta.
- k_f - Amostra relacionada ao instante final da falta.
- k_{min} - Número mínimo de amostras para detecção de falta.
- $L^2(\mathfrak{R})$ - Espaço de sinais de energia finita.
- N_s - Índice da última amostra do sinal original.
- N_w - Janela de dados.
- \mathfrak{R} - Conjunto dos números reais.
- Z - Conjunto dos números inteiros.
- $W_f(a, b)$ - Coeficientes wavelet contínuos da função $f(t)$.
- $\psi(t)$ - Função wavelet mãe.
- $\Psi(\omega)$ - Transformada de Fourier de uma função wavelet mãe.
- $\varphi(t)$ - Função escalonamento.
- λ_j - Limiar usado para a filtragem dos coeficientes wavelet.
- λ_{EF} - Limiar usado para classificação de falta.
- λ_{EN} - Limiar usado para classificação de falta.
- ΔE - Variação de energia em cinco amostras consecutivas.

ΔE_{min} - Valor mínimo de variação de energia.

Δk - Duração do distúrbio.

Δk_{ciclo} - Número de amostras num ciclo.

GLOSSÁRIO

AGD	-	Angelim II.
AM	-	Análise multiresolução.
ART	-	<i>Adaptive resonance theory.</i>
ATP	-	<i>Alternative transients program.</i>
BEA	-	Boa Esperança.
BNB	-	Banabuiú.
CGD	-	Campina Grande II.
CHESF	-	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
DMG	-	Delmiro Gouveia.
ITB	-	Itabaiana.
LT	-	Linha de transmissão.
LVQ	-	<i>learning vector quantization.</i>
MLG	-	Milagres.
MLP	-	<i>Multilayer perceptron.</i>
NTD	-	Natal II.
PAU	-	Paulo Afonso.
QEE	-	Qualidade da Energia Elétrica.
RCD	-	Recife II.
RDP	-	Registrador digital de perturbação.
RNA	-	Rede neural artificial.

- SCD - Santa Cruz II.
- SJP - São João do Piauí.
- TW - Transformada wavelet.
- TWC - Transformada wavelet contínua.
- TWD - Transformada wavelet discreta.
- ULG - Usina Luiz Gonzaga.
- WAN - *Wide area network*.

INTRODUÇÃO

Os principais distúrbios em sistemas de transmissão de energia elétrica são as faltas (curto-circuitos), os fenômenos transitórios oriundos de manobras de chaveamento e os harmônicos. As faltas, em especial, merecem maior atenção pois envolvem o desligamento forçado de um ou mais componentes do sistema, sendo provocadas por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica.

O diagnóstico do distúrbio é feito através da análise dos sinais de tensão e corrente e consiste na execução das etapas de detecção, localização e classificação dos diversos eventos. O diagnóstico é essencial para definir as causas e conseqüências dos distúrbios, visto que ele fornece informações que resultam em sugestões e recomendações para a melhoria contínua do desempenho do sistema elétrico. Nesse contexto, destaca-se a *oscilografia*, que consiste no monitoramento constante das grandezas elétricas do sistema. Esse monitoramento é normalmente feito pelos *registradores digitais de perturbação* (RDP).

Os RDP são indispensáveis para a análise de ocorrências nos sistemas de transmissão de energia elétrica, possuindo recursos de armazenamento e transferência de dados através de comunicação remota via rede WAN (*Wide Area Network*), que possibilita a formação de redes de monitoramento de grande porte, denominadas convenientemente de *redes oscilográficas*.

As redes oscilográficas são responsáveis pelo monitoramento das linhas de transmissão (LT), além da supervisão de certos equipamentos como transformadores, banco de capacitores e compensadores estáticos (Apêndice A).

A oscilografia foi concebida, principalmente, com o intuito de avaliar o desempenho dos sistemas de proteção e dos equipamentos a ele relacionados, quando da ocorrência de uma falta. No entanto, é comum a captura de registros oscilográficos referentes a outros fenômenos, como transitórios devido ao chaveamento de banco de capacitores, energizações e desligamentos de LT e afundamentos de tensão.

1.1 MOTIVAÇÃO

As recentes alterações na estrutura do setor elétrico têm obrigado as empresas a monitorarem mais pontos no sistema para assim, comprovarem a qualidade de seus serviços. Como consequência, aumentou-se o número de RDP, e naturalmente, o número de registros oscilográficos a serem analisados. A incapacidade dos RDP em discriminarem automaticamente os distúrbios e o crescente aumento no número de RDP, aumentou o tráfego na rede interna e sobrecarregou os usuários que fazem análise manual dos registros oscilográficos.

Uma alternativa para solucionar o problema de caráter operacional, associado a grande quantidade de registros oscilográficos transferidos para o servidor central da oscilografia, é através da análise automática dos registros no concentrador. Desta forma, apenas os distúrbios mais significativos serão identificados e transferidos. A análise automática pode ser realizada por algoritmos baseados, por exemplo, na transformada wavelet (TW), os quais serão integrados ao automatismo de uma subestação.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral dessa dissertação é desenvolver um método de detecção e classificação de faltas em LT a partir da análise das tensões e correntes contidos em registros oscilográficos.

Os objetivos específicos são:

- Estabelecer um conjunto de regras baseadas na TW, para detectar registros oscilográficos com falta.
- Estabelecer um conjunto de regras baseadas na TW, para classificar faltas em LT.
- Avaliar o desempenho do método proposto utilizando registros reais obtidos em diversas LT do sistema de transmissão da CHESF.
- Integrar o método proposto ao sistema Wavan[©] (Apêndice C).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos. No capítulo 1 apresenta-se uma introdução geral do trabalho. No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica das publicações mais significativas, principalmente internacionais, que utilizam técnicas alternativas para análise de distúrbios em LT.

Nos capítulos 3 e 4 apresentam-se a fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido. Conceitos da TW são apresentados no capítulo 3 e de distúrbios em sistemas de potência são abordados no capítulo 4.

Aspectos relativos ao método proposto são descritos no capítulo 5. O conjunto de regras estabelecidos para a detecção, delimitação da duração e classificação de faltas são apresentados de forma detalhada.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados da avaliação do método proposto. Foram considerados um conjunto de registros oscilográficos reais, obtidos em diversas LT do sistema de transmissão da CHESF, no período de 2003 a 2005.

Por fim, no capítulo 7 apresentam-se as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Grande parte das ocorrências em sistemas de transmissão de energia elétrica são associados a transitórios eletromagnéticos, cujos sinais de tensão e corrente são não-estacionários no tempo e na frequência. Em vista disso, é crescente o uso da TW como ferramenta de diagnóstico de distúrbios em sistemas de potência, conforme se constata da revisão bibliográfica apresentada a seguir.

Kim & Aggarwal (2001) propuseram um algoritmo para detecção de faltas baseado nos coeficientes wavelet, da primeira escala, dos sinais de corrente de fase. O método emprega um esquema de janelamento de dados e avalia o somatório dos coeficientes wavelet, em valor absoluto, em cada janela. A falta é detectada se o valor de uma janela, referente a uma determinada corrente, ultrapassar um limiar estabelecido previamente. Os autores afirmam que esse módulo pode ser estendido para identificar as correntes das fases envolvidas com a falta, uma vez que nessas correntes, o somatório dos coeficientes wavelet, em uma janela específica ultrapassa o limiar. Os autores ainda discutem a possibilidade de detecção de distúrbios de qualidade de energia elétrica (QEE) utilizando a TW. Foram indicadas as wavelets mãe Daubechies 4 (db4) e Daubechies 6 (db6) (DAUBECHIES, 1992) como sendo as mais apropriadas para as aplicações abordadas.

Youssef (2001) propôs um algoritmo de classificação de faltas em LT baseado na transformada wavelet discreta (TWD) para ser aplicado em tempo real. Regras de classificação foram estabelecidas mediante a comparação dos coeficientes wavelet janelados das correntes da primeira escala, com limiares padrões pré-estabelecidos. A wavelet mãe utilizada foi a Daubechies 3. Os cenários de faltas utilizados para avaliar o algoritmo foram simulados num programa do tipo EMTP, considerando 11 tipos de faltas com diversos valores de resistência, ângulo de incidência e distância de falta. Não apresentou-se o desempenho do método diante dos cenários de faltas simulados, sendo a aplicação do algoritmo restrita a alguns exemplos.

Solanki *et al.* (2001) utilizaram a TWD para detecção e classificação de faltas em LT. O algoritmo proposto foi concebido para aplicações em tempo real, avaliando-se a wavelet mãe mais adequada e levando-se em consideração o número de operações em ponto flutuante. Entretanto, o algoritmo foi avaliado apenas com sinais de um sistema simples, modelado no ATP, composto basicamente por uma LT com comprimento de 190 km, ligada a uma fonte em cada terminal. A detecção e classificação foram realizadas através da comparação dos coeficientes wavelet das escalas 1, 2 e 3 e dos coeficientes de aproximação da escala 3 com limiares pré-estabelecidos. Admitiu-se que o valor absoluto dos coeficientes durante a falta é maior que os do período de pré-falta. A metodologia apresentada para a classificação da falta não é clara e não foram apresentados resultados. Outros métodos de detecção e classificação de faltas baseados na comparação dos coeficientes wavelet com valores de limiares também têm sido propostos (PROBERT; SONG, 2002; SOLANKI; SONG, 2003; JIANG *et al.*, 2003).

Santoso *et al.* (1994) propuseram uma nova abordagem para detectar e localizar alguns distúrbios relacionados a QEE, dando-se ênfase aos transitórios rápidos e lentos. O primeiro apresenta variações rápidas e abruptas de curta duração, sendo apropriada a utilização da db4 ou db6. O segundo apresenta mudanças suaves nas formas de onda, sendo as wavelets Daubechies 8 (db8) e Daubechies 10 (db10) mais apropriadas. De acordo com os autores, a db4 apresentou melhores resultados para análise de transitórios de chaveamento, enquanto que a db10 foi mais apropriada na análise de afundamentos de tensão e distorções harmônicas.

Santoso *et al.* (1996) apresentaram as características da análise multiresolução (AM) da TW e como ela pode ser aplicada à detecção e localização de distúrbios de QEE. Uma série de registros com vários tipos de distúrbios foi analisada utilizando a técnica de detecção proposta por Santoso *et al.* (1994).

Reddy & Rao (1998) mostraram como a TWD pode ser aplicada na detecção de transitórios de chaveamento. Os autores modelaram um sistema elétrico simples para simular a energização de bancos de capacitores. Os sinais de tensão foram decompostos em várias escalas e as características que possibilitam a detecção foram abordadas. Nenhum método de detecção e nenhum resultado foram apresentados.

Mo & Kinsner (1997) mostraram que é viável a classificação dos vários tipos de transitórios eletromagnéticos utilizando a AM. Uma vez que os transitórios são sinais não estacionários, os autores afirmam que a TW é adequada para detecção desses eventos. Os autores utilizaram dois sinais de tensão com transitórios, um referente a uma falta e outro referente a uma operação de chaveamento de um banco de capacitores. Cada sinal foi decomposto até a quinta escala e as principais características dos coeficientes wavelet, relativas a cada escala, foram abordadas. Os autores concluíram que é possível determinar a duração dos eventos com base nos coeficientes wavelet da primeira escala e também classificar o tipo de evento que deu origem aos transitórios. Nenhuma metodologia para detecção e classificação de transitórios foi apresentada, mas os autores sugeriram a utilização das redes neurais artificiais (RNA) para realizar a classificação dos transitórios a partir das características extraídas dos coeficientes wavelet em diversas escalas.

Poisson *et al.* (1998) utilizaram a transformada wavelet contínua (TWC) para detectar afundamentos de tensão e transitórios oscilatórios. Os valores de pico dos coeficientes wavelet, em altas frequências, foram utilizados para localizar no tempo, as mudanças bruscas ocorridas nos sinais. A detecção dos distúrbios foi realizada comparando-se os picos com valores pré-definidos da parte do sinal em regime permanente. A distinção entre afundamento de tensão e transitório é baseada na duração e no número de picos excedendo um certo limiar. Dados adicionais (amplitude, duração e forma de onda das tensões em outras frequências) também foram utilizados para caracterizar um afundamento de tensão ou um transitório. O desempenho do método foi avaliado com mais de 1500 registros reais obtidos de um sistema elétrico com sinais amostrados a 4 kHz, 6,4 kHz ou 10 kHz. Os resultados obtidos na detecção foram comparados com métodos clássicos. O número total de registros com afundamentos de tensão não foi especificado, mas 518 registros dessa natureza foram devidamente detectados. Em 55 % dos casos obteve-se um erro de 20 ms (1 ciclo a 50 Hz) durante a etapa de localização no tempo. Um total de 1200 registros reais com transitórios foram testados e 892 registros foram diagnosticados corretamente.

Parsons *et al.* (1999) utilizaram a TWD para identificar os instantes inicial e final de afundamentos de tensão. A AM foi utilizada para decompor os sinais de tensão até a primeira escala wavelet, seguida pela filtragem dos coeficientes wavelet. A etapa de filtragem teve como objetivos eliminar os coeficientes relativos aos ruídos de natureza elétrica e preservar os coeficientes relacionados aos transitórios eletromagnéticos presentes no sinal. Desta forma, identificaram-se os instantes inicial e final do afundamento de tensão. Várias wavelets mãe foram avaliadas, das quais selecionou-se a db6. Os resultados foram comparados com um método tradicional, que emprega a definição de afundamento de tensão baseado no valor RMS dos sinais de tensão.

Técnicas baseadas nas RNA também vêm sendo propostas para detecção e classificação de faltas em sistemas de potência (SILVA, 2002; KEZUNOVIC *et al.*, 2002; MAHANTY; GUPTA, 2004; SOUZA *et al.*, 2004; SILVA, 2005). Kezunovic & Rikalo (1996) utilizaram uma RNA, do tipo ART (*adaptive resonance theory*), aplicada à classificação de faltas. Apenas os sinais de corrente de fase, simulados em um programa do tipo EMTP, foram utilizados pela RNA em sua etapa de aprendizado. Os padrões de entrada utilizados pela RNA foram organizados na forma de janelas, com um número de amostras equivalentes a um ciclo da frequência fundamental. A metodologia proposta apresentou uma percentagem de acerto de 95,93 %. Seguindo a mesma linha de pesquisa, Giovanini & Coury (1999) empregaram uma RNA do tipo MLP (*multilayer perceptron*) à classificação de faltas. Neste caso, as correntes de fase e a componente de seqüência zero foram consideradas como padrões de entrada da RNA. O esquema de janelamento adotado utilizou apenas três amostras de corrente e o desempenho da RNA foi avaliado para cada janela de dados, alcançando uma porcentagem de acerto de 100 % após 5 ms do instante inicial da falta.

Recentemente, métodos utilizando a TW em conjunto com outras técnicas vêm sendo propostos. Dilokratatrakool *et al.* (2003) utilizaram a TWD em conjunto com as RNA para detectar e classificar alguns distúrbios de QEE. As RNA utilizadas na etapa de classificação dos distúrbios são do tipo LVQ (*learning vector quantization*), com algoritmo de aprendizado supervisionado e não-supervisionado durante a etapa de treinamento. Os sinais utilizados como padrões de entrada para as RNA são os coeficientes wavelet da primeira a quinta escala, obtidos através da AM. O classificador é composto por três conjuntos de RNA, sendo cada conjunto composto por cinco RNA, cada uma com uma única saída binária. A *i*-ésima rede neural de

cada conjunto possui como padrões de entrada os coeficientes wavelet de detalhe da i -ésima escala wavelet, com $i = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. A saída de cada um dos três conjuntos é o somatório da saída de cada uma de suas RNA. Portanto, a saída de um determinado conjunto de RNA é um número inteiro entre 0 e 5. Utilizou-se um esquema de decisão para avaliar a saída de cada um dos três conjuntos de RNA e emitir um diagnóstico de acordo com os seis tipos de distúrbios avaliados. A principal dificuldade do método proposto ocorreu durante a etapa de treinamento das RNA, visto que 15 redes neurais devem ser treinadas e testadas até alcançarem um desempenho desejado. A metodologia proposta apresentou, na etapa de testes, um acerto percentual de 84,47 % na classificação de distúrbios, para um total de 840 registros avaliados.

Shah Baki *et al.* (2002) propuseram um método para detecção e classificação de transitórios utilizando a TW juntamente com a lógica *fuzzy*. Os autores afirmam que os coeficientes wavelet da primeira escala são bastante apropriados para detecção e localização no tempo, de componentes de alta frequência comuns em sinais com transitórios. A TW foi aplicada aos sinais de tensão nas etapas de detecção e localização dos distúrbios. A classificação, entre transitórios oscilatórios e transitórios impulsivos, foi realizada por um sistema baseado na lógica *fuzzy*. Neste caso, utilizaram-se as amplitudes dos coeficientes wavelet e a duração do evento como parâmetros de entrada. As regras de detecção e classificação de transitórios utilizadas pelo método proposto não foram apresentadas. O desempenho do método foi avaliado com 37 registros reais (obtidos num período de um ano em uma subestação) e apresentou uma taxa de acerto de 94,5 % na etapa de classificação de transitórios.

Na Tabela 2.1 apresenta-se um resumo da revisão bibliográfica referente ao diagnóstico de faltas em LT. Na Tabela 2.2 apresenta-se um resumo da revisão bibliográfica referente à análise de distúrbios de QEE.

Tabela 2.1. Resumo da revisão bibliográfica referente ao diagnóstico de falta.

Referência	Objetivos			Técnica empregada	Sinais avaliados	
	Detecção	Duração	Classificação		Tensão	Corrente
Song <i>et al.</i> (1996)	-	-	✓	RNA	✓	✓
Kezunovic & Rikalo (1996)	✓	-	✓	RNA	-	✓
Giovanini & Coury (1999)	-	-	✓	RNA	-	✓
Youssef (2001)	-	-	✓	TWD	-	✓
Kim & Aggarwal (2001)	✓	-	✓	TWD	-	✓
Assef <i>et al.</i> (1996)	-	-	✓	TWD+RNA	-	✓
Solanki <i>et al.</i> (2001)	✓	-	✓	TWD	-	✓
Silva (2002)	-	-	✓	RNA	-	✓
Kezunovic <i>et al.</i> (2002)	-	-	✓	RNA+fuzzy	-	✓
Solanki & Song (2003)	✓	-	-	TWD	-	✓
Jiang <i>et al.</i> (2003)	✓	-	✓	TWD	-	✓
Mahanty & Gupta (2004)	✓	-	✓	RNA	-	✓
Youssef (2004)	-	-	✓	TWD+Fuzzy	-	✓
Pradhan <i>et al.</i> (2004)	-	-	✓	TWD+Fuzzy	-	✓
Souza <i>et al.</i> (2004)	✓	✓	✓	TWD+RNA	✓	✓
Silva (2005)	✓	✓	✓	TWD+RNA	✓	✓

Tabela 2.2. Resumo da revisão bibliográfica referente à análise de distúrbios de QEE.

Referência	Objetivos			Técnica empregada	Sinais avaliados	
	Detecção	Duração	Classificação		Tensão	Corrente
Santoso <i>et al.</i> (1996)	DQEE	DQEE	-	TWD	✓	-
Mo & Kinsner (1997)	Trans.	-	Trans.	TWD	✓	-
Lee <i>et al.</i> (1997)	DQEE	-	DQEE	TWD+RNA	✓	-
Reddy & Rao (1998)	Trans.	-	-	TWD	✓	-
Parsons <i>et al.</i> (1999)	-	Afund.	-	TWD	✓	-
Poisson <i>et al.</i> (1998)	DQEE	DQEE	DQEE	TWC	✓	-
Borrás <i>et al.</i> (2001)	DQEE	-	DQEE	RNA+TWD	✓	-
Resende <i>et al.</i> (2001)	DQEE	DQEE	DQEE	TWD	✓	-
Shah Baki <i>et al.</i> (2002)	Trans.	-	Trans.	TWD+Fuzzy	✓	-
Probert & Song (2002)	Trans.	-	Trans.	TWD	-	✓
Dilokratatrakool <i>et al.</i> (2003)	DQEE	-	DQEE	RNA+TWD	✓	-

Trans. - Transitórios.

Afund. - Afundamentos de tensão.

DQEE - Vários distúrbios de qualidade da energia elétrica.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TRANSFORMADA WAVELET

A teoria wavelet envolve a representação de funções em termos de funções bases em diferentes escalas e posições, realizando uma análise multiresolucional. A idéia de focalizar uma função (ou sinal) sob escalas diferentes e analisá-la com várias resoluções surgiu independentemente em várias áreas da matemática, física e engenharia. Desde a sua formalização, na década de 80, a teoria wavelet vem despertando enorme interesse nas mais diversas áreas do conhecimento, inclusive em Sistemas Elétricos de Potência.

Apresenta-se a seguir uma breve introdução dos conceitos básicos dessa teoria, dando-se ênfase a sua versão discreta.

3.1.1 A Transformada Wavelet Contínua

Uma transformada é uma ferramenta matemática que mapeia uma função do seu domínio original para outro domínio, no qual a identificação de certos aspectos da função seja mais adequada. A TWC de uma função $f(t)$ é definida como o produto interno entre $f(t)$ e as funções $\psi_{a,b}(t)$, denominadas de *wavelets filhas*:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt, \quad (3.1)$$

sendo: $\psi_{a,b}(t) \in L^2(\mathfrak{R})$; $L^2(\mathfrak{R}) = \{L : \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}; \int |f(t)|^2 dt < \infty\}$ o espaço de sinais de energia finita; $W_f(a, b)$ os coeficientes wavelet contínuos da função $f(t)$; $a \in \mathfrak{R}$ é o fator escala (equivalente ao inverso da frequência) e $b \in \mathfrak{R}$ é o fator translação, ambas variáveis contínuas.

As wavelets filhas são funções obtidas de uma função protótipo $\psi(t)$, denominada de *wavelet mãe* (Figura 3.1), através de operações simultâneas de escalonamento (Figura 3.2(a)) e translação (Figura 3.2(b)), da seguinte forma:

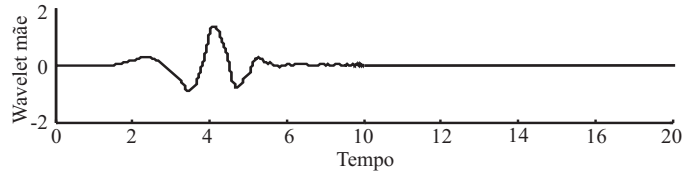
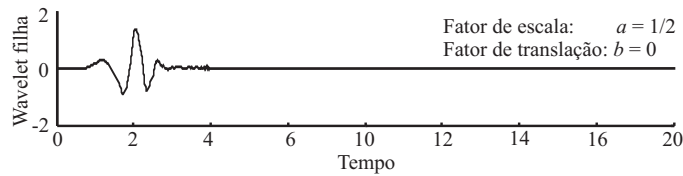
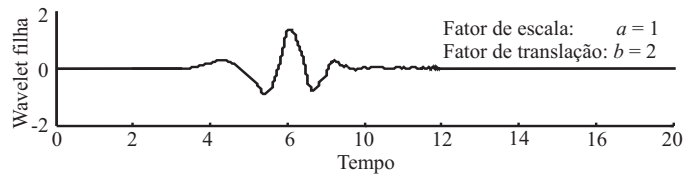


Figura 3.1. Wavelet mãe Daubechies 4.



(a)



(b)

Figura 3.2. Wavelets filhas obtidas da wavelet mãe Daubechies 4 através de uma operação de: (a) escalonamento; (b) translação.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (3.2)$$

Portanto, das equações (3.1) e (3.2), os coeficientes wavelet contínuos da função $f(t)$ podem ser matematicamente, obtidos da seguinte forma:

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3.3)$$

O processo de obtenção dos coeficientes wavelet contínuos de um sinal é apresentado a seguir (MISITI *et al.*, 2002).

1. Alinhar a wavelet mãe escolhida com o trecho inicial do sinal original (Figura 3.3).

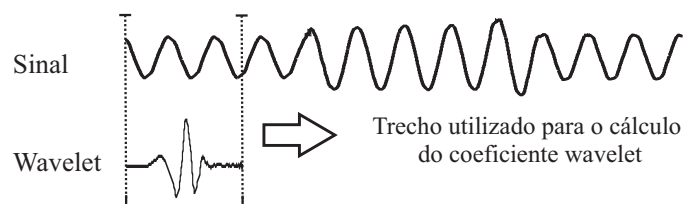


Figura 3.3. Cálculo do coeficiente wavelet.

2. Calcular o coeficiente, através da equação (3.3), que representa "o quanto" a wavelet está relacionada com o trecho do sinal. Quanto maior a similaridade do trecho do sinal com a wavelet mãe, maior será o valor do coeficiente. Portanto, o resultado vai depender da forma da wavelet mãe escolhida.
3. Transladar a wavelet mãe para a direita (Figura 3.4) e repetir os passos 1 e 2 até que todo o sinal tenha sido analisado.

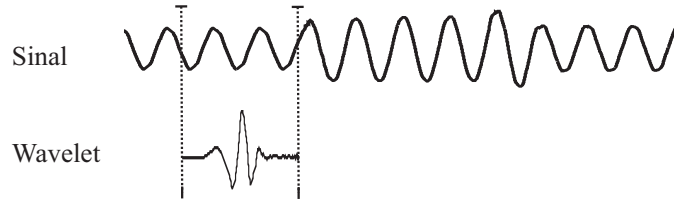


Figura 3.4. Translação da wavelet.

4. Dilatar a wavelet e repetir os passos de 1 a 3 (Figura 3.5).

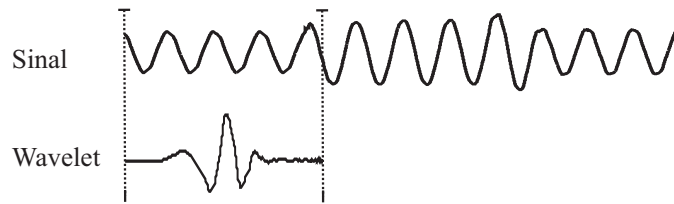


Figura 3.5. Escalonamento da wavelet.

5. Repetir os passos de 1 a 4 para todas as escalas.

Após o término do processo descrito acima, obtêm-se os coeficientes wavelet em diferentes escalas e trechos do sinal.

As wavelets são funções oscilatórias assimétricas e de curta duração. Em termos matemáticos, um sinal $\psi(t)$ representa uma função wavelet mãe, se e somente se (BURRUS *et al.*, 1998):

1. $\psi(t) \in L^2(\mathfrak{R})$, ou seja, $\psi(t)$ pertence ao espaço de energia finita.
2. Satisfaz a condição de admissibilidade: $C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw < +\infty$, em que $\Psi(w)$ é a transformada de Fourier da wavelet mãe e C_ψ é a constante de admissibilidade.

Da primeira condição, $\Psi(w)$ se anula quando a frequência tende ao infinito, pois o sinal possui energia finita. Da segunda condição, $\Psi(w)$ se anula quando a frequência tende a origem, ou seja, $\lim_{w \rightarrow 0} \Psi(w) = 0 \Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$. Desta forma, o valor médio de uma função wavelet é nulo. Essas características indicam que, no contexto de processamento digital de sinais, uma wavelet mãe pode ser definida como um filtro passa-faixa, pois:

$$\lim_{w \rightarrow \pm\infty} \Psi(w) = 0 \quad (3.4)$$

e

$$\lim_{w \rightarrow 0} \Psi(w) = 0. \quad (3.5)$$

3.1.2 Banco de Filtros e a Transformada Wavelet Discreta

A TWC mapeia um sinal unidimensional (tempo) em um domínio bidimensional (tempo versus frequência) que é altamente redundante, o que requer tempo de processamento e recursos computacionais elevados para realizar as operações de translações e escalonamentos contínuos. Para contornar esse problema, tem-se a TWD.

Na TWD a wavelet mãe não é transladada nem escalonada continuamente, mas em intervalos discretos. A versão discreta das wavelets filhas contínuas (equação 3.2) é dada por:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a_0^j|}} \psi \left(\frac{t - kb_0 a_0^j}{a_0^j} \right), \quad (3.6)$$

sendo $j, k \in \mathfrak{S}$; $a_0 > 1$ um parâmetro de dilatação fixo e b_0 o fator de translação.

Observa-se que a discretização da TWC ocorre apenas no domínio dos parâmetros (escala e translação).

Comparando-se as wavelets contínuas (equação (3.2)) com as wavelets discretas (equação (3.6)), observa-se:

1. $a = a_0^j$.
2. $b = kb_0 a_0^j$.

Sendo $j = \{1, 2, 3, \dots\}$ e $k = \{1, 2, 3, \dots\}$.

Geralmente, adota-se $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$. Assim, os coeficientes wavelet discretos de uma função $f(t)$ são:

$$W_f(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(2^{-j}t - k) dt. \quad (3.7)$$

Mallat (1989), baseado na AM, propôs um algoritmo rápido e eficiente para o cálculo da TWD, podendo ser interpretada como um banco de filtros. Matematicamente, tem-se:

$$c_{j+1}(k) = \sum_n h(n - 2k)c_j(n) \quad (3.8)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum_n g(n - 2k)c_j(n), \quad (3.9)$$

sendo c_{j+1} e d_{j+1} os coeficientes de aproximação e detalhes da escala $j + 1$, respectivamente. $h(k)$ e $g(k)$ se caracterizam como sendo filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

As equações (3.8) e (3.9), no contexto de processamento de sinais digitais, representam um processo de filtragem digital, seguido por sub-amostragem por um fator de dois. Os coeficientes de aproximação $c_{j+1}(k)$ e os coeficientes de detalhes (coeficientes wavelet) $d_{j+1}(k)$, na escala $j + 1$, são obtidos pela convolução dos coeficientes de aproximação $c_j(k)$ da escala anterior com os filtros $h(k)$ e $g(k)$, respectivamente, seguidos por dizimação por dois. De acordo com essas equações, os coeficientes de aproximação e wavelet, na primeira escala, são:

$$c_1(k) = \sum_n h(n - 2k)c_0(n) \quad (3.10)$$

$$d_1(k) = \sum_n g(n - 2k)c_0(n), \quad (3.11)$$

sendo c_0 o sinal original.

Apresenta-se na Figura 3.6 o processo de decomposição de um sinal amostrado no tempo $c_0(k)$, a uma frequência de amostragem f_s , através da técnica de filtragem denominada de *lifting* (DAUBECHIES, 1992). Utilizou-se apenas um estágio da TWD, conforme equações (3.10) e (3.11). Os blocos com o símbolo $\downarrow 2$ representam a operação de subamostragem por dois, enquanto os outros blocos representam a convolução do sinal de entrada com o filtro $h(k)$ ou $g(k)$.

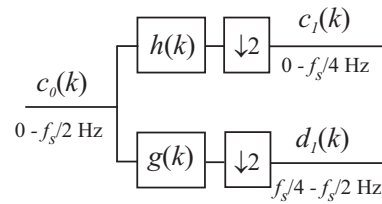


Figura 3.6. Bloco da TWD.

O sinal original $c_0(k)$ (Figura 3.6), após ser apresentado a um estágio da TWD, é decomposto nas componentes $c_1(k)$ e $d_1(k)$ que são respectivamente, os coeficientes de aproximação e wavelet da primeira escala. Devido ao processo de sub-amostragem, o número de amostras dos sinais obtidos é reduzido pela metade do sinal original. A componente $c_1(k)$ é a saída sub-amostrada do filtro passa-baixa $h(k)$, a qual possui conteúdo de mais baixa frequência e pode ser interpretada como uma aproximação do sinal original. Por outro lado, a componente $d_1(k)$ é a saída sub-amostrada do filtro passa-alta $g(k)$, retendo o conteúdo de mais alta frequência e os detalhes do sinal. Na Figura 3.7 apresenta-se um sinal no domínio do tempo. Os respectivos coeficientes de aproximação e wavelet, na primeira escala, obtidos com a wavelet mãe db4 são apresentados na Figura 3.8.

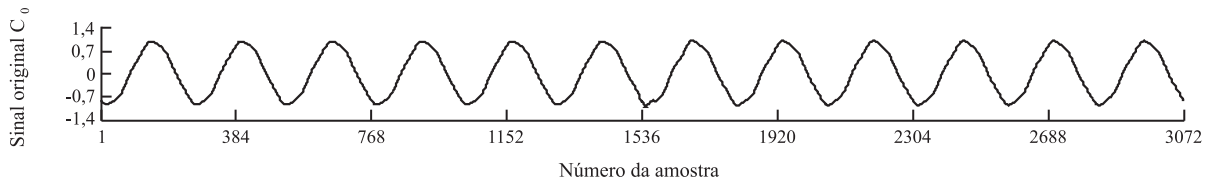
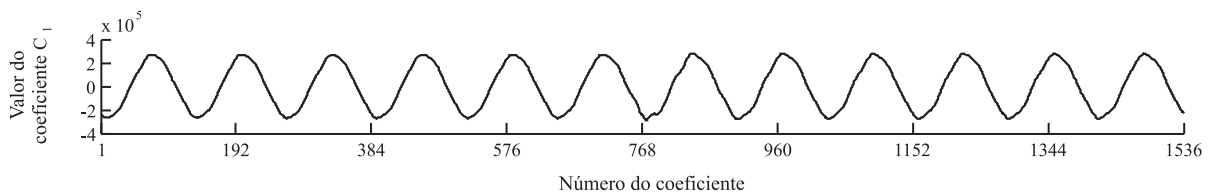
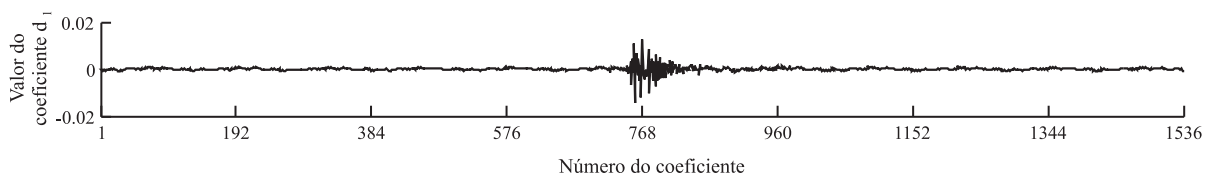


Figura 3.7. Sinal original.



(a)



(b)

Figura 3.8. Componentes do sinal original após aplicação de um estágio da TWD: (a) coeficientes de aproximação; (b) coeficientes wavelet.

Os coeficientes de aproximação da primeira escala podem ser decompostos em mais duas componentes (segunda escala), representadas por:

$$c_2(k) = \sum_n h(n - 2k)c_1(n) \quad (3.12)$$

$$d_2(k) = \sum_n g(n - 2k)c_1(n). \quad (3.13)$$

Da mesma forma, $c_2(k)$ pode ser decomposto em mais duas componentes, e assim por diante. Esse processo é apresentado na Figura 3.9 considerando três estágios de aplicação da TWD.

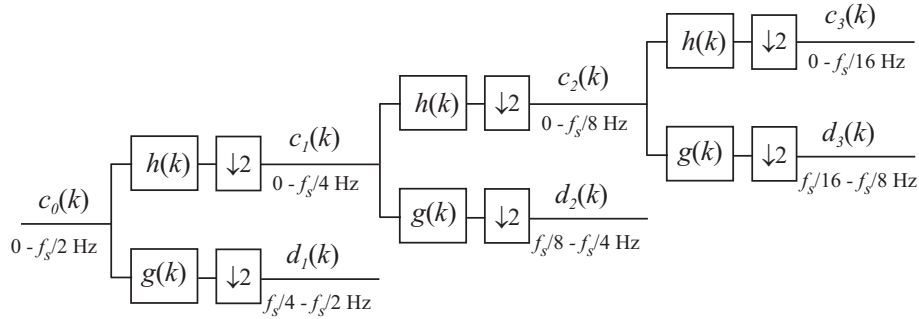


Figura 3.9. Três estágios da TWD.

De acordo com a Figura 3.9, o sinal original $c_0(k)$, após ser apresentado a um estágio da TWD, é decomposto nas componentes $c_1(k)$ e $d_1(k)$ que são respectivamente, os coeficientes de aproximação e wavelet da primeira escala. Os coeficientes de aproximação $c_1(k)$ são apresentados a mais um estágio da TWD gerando mais duas componentes, $c_2(k)$ e $d_2(k)$, que são respectivamente os coeficientes de aproximação e wavelet do segundo nível de decomposição.

O sinal original $c_0(k)$ pode ser decomposto em termos dos coeficientes wavelet nos diversos níveis de resolução $\{1, 2, \dots, J\}$ e nos coeficientes de aproximação da escala J (BURRUS *et al.*, 1998). No entanto, o número de estágios da TWD (decomposições) é limitado pelo número de amostras (N_s) do sinal original, que por sua vez, deve ser uma potência de dois. Desta forma, o número máximo de decomposições (J_{max}) pode ser obtido através da equação:

$$N_s = 2^{J_{max}-1}. \quad (3.14)$$

Pelo teorema da amostragem de Nyquist (OPPENHEIM; SCHAFER, 1989), um sinal amostrado a uma frequência de amostragem f_s , possui um espectro de frequência limitado, variando de 0 a $f_s/2$ Hz. Daubechies (1992) projetou os filtros digitais $h(k)$ e $g(k)$ como filtros espelhados em quadraturas, os quais dividem o espectro de frequência do sinal de entrada pela metade.

Como resultado da utilização de pares de filtros escalonados em oitavas, os coeficientes de aproximação na primeira escala possuem espectro de frequência variando de 0 a $f_s/4$ Hz, enquanto que os coeficientes wavelet nesta escala possuem banda de passagem de $f_s/4$ a $f_s/2$ Hz. No segundo nível de resolução, os coeficientes de aproximação e wavelet possuem espectro de frequência de 0 a $f_s/8$ Hz e de $f_s/8$ a $f_s/4$ Hz, respectivamente (Figura 3.9). Neste sentido, o espectro de frequência para os coeficientes de aproximação e wavelet em uma escala j são, respectivamente:

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{j+1}}\right], \quad (3.15)$$

$$\left[\frac{f_s}{2^{j+1}}, \frac{f_s}{2^j}\right]. \quad (3.16)$$

3.1.3 A Transformada Wavelet Discreta Inversa

A reconstrução do sinal original é realizada através da TWD inversa, cuja estrutura de bancos de filtros é semelhante aquela utilizada na decomposição do sinal original, mas na ordem reversa (Figura 3.10).

Na Figura 3.10 apresenta-se o processo de reconstrução de um sinal amostrado no tempo $c_0(k)$ a uma frequência de amostragem f_s , utilizando três estágios da TWD inversa. Os blocos com o símbolo $\uparrow 2$ representam a operação de sobreamostragem por dois, enquanto os outros blocos representam a convolução de um sinal com o filtro $h(k)$ ou $g(k)$.

Os coeficientes de aproximação $c_2(k)$ da segunda escala são obtidos através da aplicação da TWD inversa aos coeficientes de aproximação $c_3(k)$ e wavelet $d_3(k)$, da terceira escala (Figura 3.10). Este processo se repete até que o sinal original $c_0(k)$ seja reconstruído.

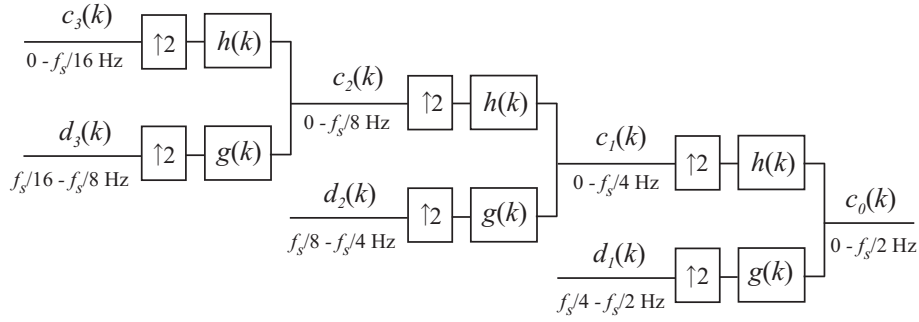


Figura 3.10. Três estágios da TWD inversa.

3.1.4 Energia dos Coeficientes Wavelet

O *teorema de Parseval* (BURRUS *et al.*, 1998), estabelece que a energia do sinal original c_0 é igual a soma das energias concentradas dos coeficientes wavelet nos diferentes níveis de resolução, $j = \{1, 2, \dots, J\}$, com a energia concentrada dos coeficientes de aproximação no último nível de resolução J considerado, $J \leq J_{max}$. Isso significa que a energia do sinal pode ser particionada em termos da energia dos coeficientes wavelets da seguinte forma:

$$\sum_{k=1}^{N_s} |c_0(k)|^2 = \sum_{k=1}^{N_s/2^J} |c_J(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N_s/2^j} |d_j(k)|^2, \quad (3.17)$$

sendo:

$$\sum_{k=1}^{N_s} |c_0(k)|^2: \text{ energia do sinal original.}$$

$$\sum_{k=1}^{N_s/2^J} |c_J(k)|^2: \text{ energia concentrada dos coeficientes de aproximação da escala } J.$$

$$\sum_{k=1}^{N_s/2^j} |d_j(k)|^2: \text{ energia dos coeficientes wavelet da escala } j.$$

DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica são responsáveis pelo transporte de grandes blocos de energia elétrica das unidades geradoras até os grandes centros consumidores (centros urbanos e pólos industriais). O crescente nível de dependência do fornecimento de energia elétrica da sociedade moderna e a recente reestruturação do setor elétrico nacional vêm exigindo das empresas de transmissão de energia elétrica investimentos vultosos nas atividades relacionadas à QEE. Neste cenário, destaca-se a análise de distúrbios de registros oscilográficos. Os principais distúrbios em LT são: faltas, afundamentos de tensão, transitórios oriundos dos chaveamentos de banco de capacitores, energizações e desligamentos de LT, cujas principais características são apresentadas a seguir.

Nessa dissertação deu-se ênfase à classe de distúrbios denominada de faltas.

4.1 TRANSITÓRIOS

Fenômenos transitórios em sistemas de potência são distúrbios que ocorrem em um intervalo de tempo muito curto, geralmente com duração inferior a um ciclo. Após a sua ocorrência, o sistema elétrico retorna rapidamente ao regime permanente (SANKARAN, 2002). Dentre as principais causas que conduzem ao surgimento de transitórios, destacam-se as descargas atmosféricas, interrupções de correntes de falta, chaveamentos de cargas de LT e bancos de capacitores.

Os transitórios são classificados, conforme sua duração e amplitude, em transitórios impulsivos ou oscilatórios (Tabela 4.1) (DUGAN *et al.*, 2003).

Apesar da curta duração, os transitórios são distúrbios importantes, visto que os equipamentos presentes no sistema elétrico podem ser submetidos a grandes solicitações de energia.

Tabela 4.1. Categorias e características dos transitórios em sistemas elétricos de potência.

Categoria		Duração típica	Conteúdo espectral típico	Amplitude de tensão típica (pu)
Impulsivos	Nanosegundo	$< 50 \eta \text{ s}$	-	-
	Microsegundo	$50 \eta - 1 \text{ ms}$	-	-
	Milisegundo	$> 1 \text{ ms}$	-	-
Oscilatórios	Baixa frequência	0,3 - 50 ms	$< 5 \text{ kHz}$	0 - 4
	Média frequência	$20 \mu \text{ s}$	5 - 500 kHz	0 - 8
	Alta frequência	$5 \mu \text{ s}$	0,5 - 5 MHz	0 - 4

4.1.1 Transitórios Impulsivos

Os transitórios impulsivos são mudanças repentinas nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, causados por descargas atmosféricas e normalmente, caracterizados pelo tempo de subida e descida (DUGAN *et al.*, 2003).

Esses transitórios são fenômenos aleatórios e geralmente possuem tempo de subida da ordem de um microsegundo, seguido por um decaimento em torno de poucas centenas de microsegundos (CHOWDHURI, 1996). Portanto, uma análise detalhada desse tipo de distúrbio requer dos equipamentos de monitoração, uma taxa de amostragem muito alta (PROBERT; SONG, 2002).

4.1.2 Transitórios Oscilatórios

Transitórios oscilatórios são fenômenos decorrentes de chaveamento de cargas e bancos de capacitores, eliminação de faltas, energização e desligamento de LT. Esses transitórios são caracterizados pela sua duração e amplitude (Tabela 4.1).

Transitórios oscilatórios de alta frequência são normalmente, resultantes de uma resposta do sistema a um transitório impulsivo. Os transitórios oscilatórios de média frequência podem ser resultantes da energização de capacitores, operações de chaveamento para eliminação de faltas, energização e desligamento de LT ou da resposta do sistema a um transitório impulsivo. Os transitórios oscilatórios de baixa frequência podem ser causados pela energização de banco de capacitores (DUGAN *et al.*, 2003).

Na Figura 4.1 apresenta-se um registro oscilográfico real¹, cujos transitórios são devidos a energização de um banco de capacitores².

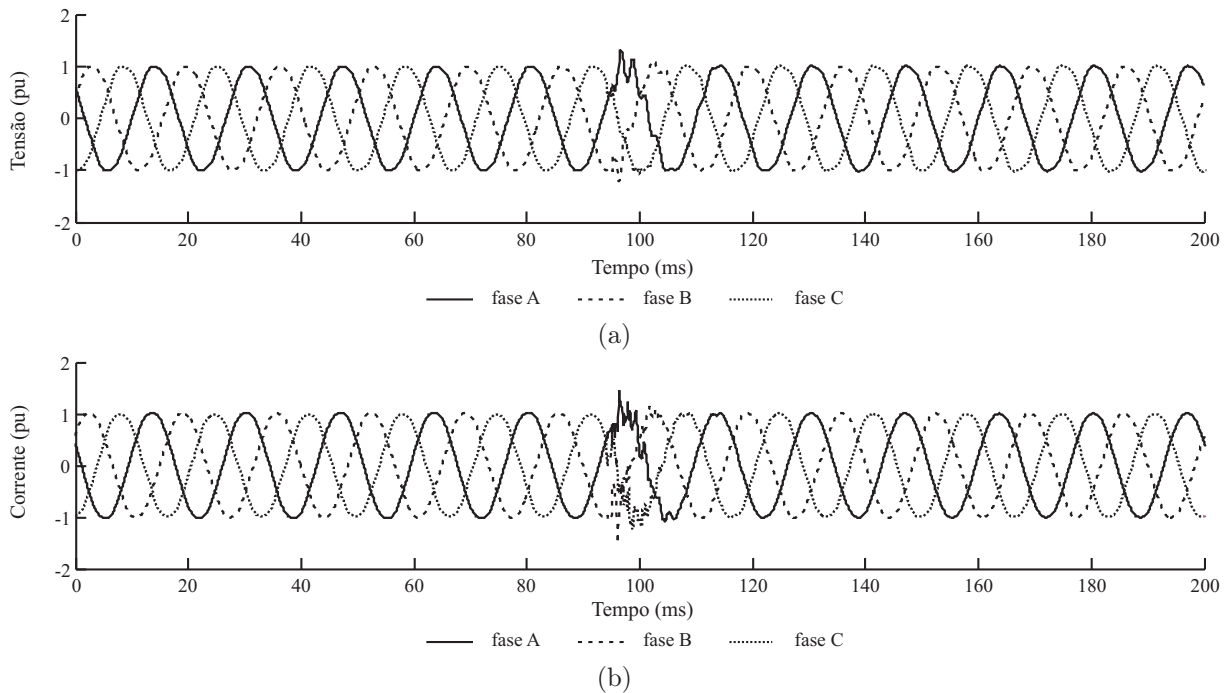


Figura 4.1. Registro oscilográfico com transitórios oscilatórios: (a) tensões; (b) correntes.

4.2 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Faltas em sistemas elétricos de potência são caracterizados como desligamentos não programados de seus componentes e podem ser provocadas por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica, originados das condições adversas às quais o sistema está sempre submetido. As faltas são normalmente, classificadas em quatro tipos: monofásicas, bifásicas, bifásicas para terra e trifásicas (GROSS, 1986). Os três primeiros tipos de faltas são denominadas de faltas assimétricas, enquanto que as faltas trifásicas são denominadas de faltas simétricas.

Na Tabela 4.2 são apresentados dados referentes ao número de ocorrências de faltas no período de 2003 a 2004 no sistema de transmissão da CHESF (SOUZA *et al.*, 2004). Cerca de 68 % das faltas ocorridas no sistema são monofásicas e 25 % bifásicas, com a minoria sendo do tipo fase-fase-terra. As faltas trifásicas correspondem apenas a 7 % das ocorrências no período. De fato, na prática, a maioria das faltas em LT são monofásicas (JOHNS *et al.*, 1994).

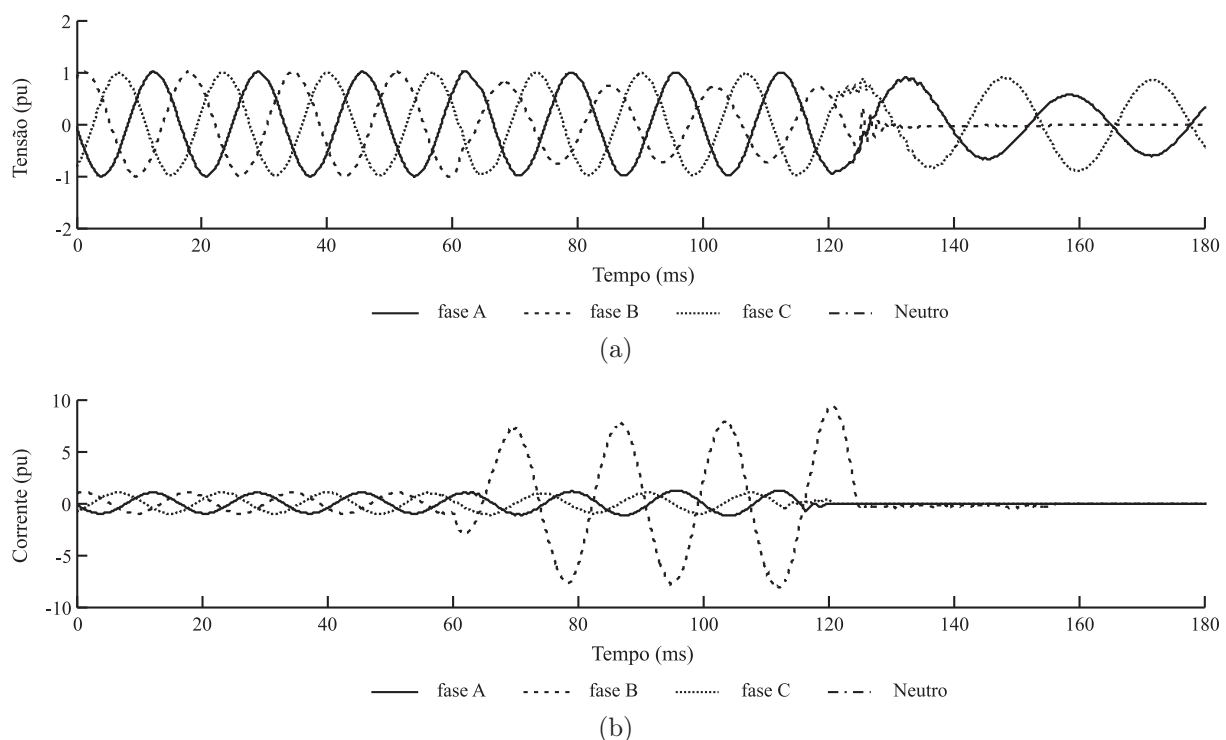
¹Distúrbio ocorrido na LT 04V2_CGD-STD, em 21 de janeiro de 2005, às 18 h, 30 min e 20 seg.

²Os registros oscilográficos reais apresentados neste trabalho foram todos obtidos em LT do sistema CHESF (Apêndice D).

Tabela 4.2. Falhas ocorridas no sistema de transmissão da CHESF no período de 2003 a 2004.

Tipo de falta	Ocorrências	Ocorrências(%)
Monofásica	2260	67,71
Bifásica	660	19,77
Bifásica para a terra	177	5,30
Trifásica	241	7,22
	3338	100,00

Na Figura 4.2 apresentam-se os sinais de tensão e corrente referentes a uma falta monofásica real³ do tipo BT.

**Figura 4.2.** Falta monofásica na fase B: (a) tensões; (b) correntes.

Os sinais de tensão e corrente em uma situação de falta apresentam características particulares conforme o tipo de falta e as condições elétricas do sistema. De um modo geral, entretanto, observa-se um aumento brusco no valor de pico da corrente e uma diminuição no valor rms da tensão na(s) fase(s) envolvidas com a falta.

O ângulo de incidência, a resistência e a localização da falta são os principais parâmetros que influenciam nas características particulares de cada tipo de falta (ANDERSON, 1999).

³Distúrbio ocorrido na LT 05L8_AGD-RCD, em 12 de janeiro de 2005, às 11 h, 19 min e 56 seg.

Apresenta-se a seguir a influência da localização, do ângulo de incidência e da resistência de falta nas características de uma falta AT, simulada no ATP. Apenas o parâmetro que está sendo analisado em cada caso é modificado, os demais permanecem constantes.

1. Na Figura 4.3 apresenta-se a influência da localização da falta nos sinais de tensão e corrente. A localização da falta é medida a partir do ponto de monitoramento até o local de ocorrência da falha e está intimamente relacionada com a intensidade do transitório sobre as tensões e com os valores de pico da corrente de falta durante o distúrbio.

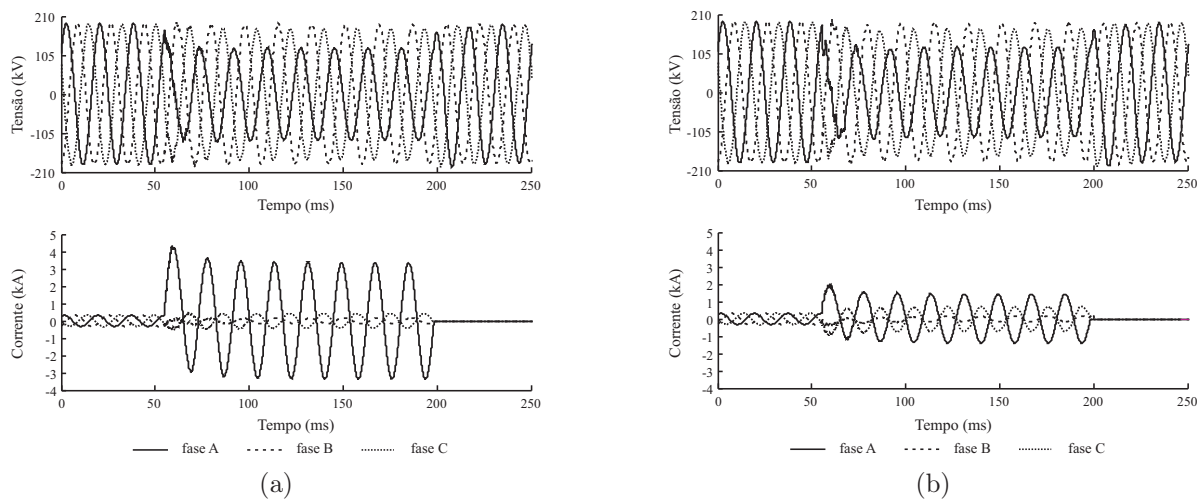


Figura 4.3. Influência da localização: (a) 1 km; (b) 100 km.

2. Na Figura 4.4 apresenta-se a influência do ângulo de incidência⁴ da falta nas tensões e correntes. Imediatamente após a ocorrência da falta, os transitórios nos sinais são mais significativos para um ângulo de incidência próximo de 90° , tornando-se menos severos à medida que o ângulo de incidência aproxima-se de 0° (JOHNS *et al.*, 1994).
3. Na Figura 4.5 apresenta-se a influência da resistência de falta nos sinais de tensão e corrente. Sabe-se que a resistência de falta reduz a intensidade dos transitórios (JOHNS *et al.*, 1994; CHEN *et al.*, 2003) e de um modo geral, a falta se torna mais severa à medida que a resistência de falta se aproxima de zero, ou seja, quanto mais a falta se aproxima de um curto-circuito franco.

⁴O ângulo de incidência é medido tomando-se a tensão na fase A como referência.

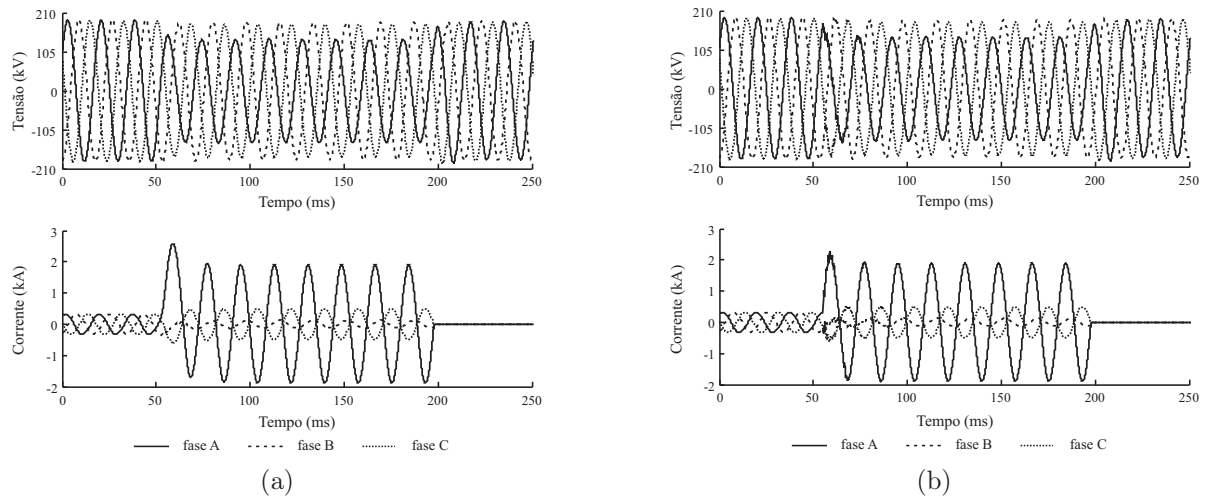


Figura 4.4. Influência do ângulo de incidência: (a) 30° ; (b) 80° .

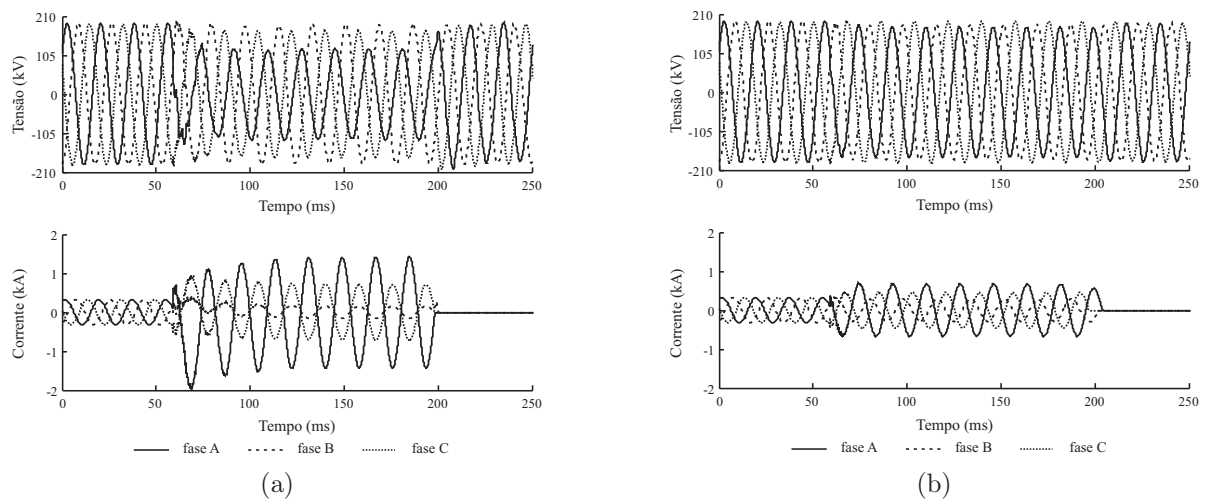


Figura 4.5. Influência da resistência de falta: (a) 1Ω ; (b) 100Ω .

4.3 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Nos sistemas elétricos de potência, variações de tensão de curta duração são normalmente, ocasionadas por condições de falta e energização de grandes cargas, as quais requerem altas correntes de partida. Dependendo da distância da falta e das condições do sistema, uma falta pode causar um afundamento de tensão, uma elevação de tensão nas fases sãs ou até mesmo, uma interrupção de tensão. Na Tabela 4.3 apresentam-se as categorias e as principais características das variações de tensão de curta duração (DUGAN *et al.*, 2003).

Tabela 4.3. Categorias e características das variações de tensão de curta duração em sistemas elétricos de potência.

	Categoria	Duração típica	Amplitude de tensão típica (pu)
Instantânea	Interrupção	0,5 - 30 ciclos	< 1,0
	Afundamento de tensão	0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9
	Elevação de tensão	0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8
Momentânea	Interrupção	30 ciclos - 3 s	< 1,0
	Afundamento de tensão	30 ciclos - 3 s	0,1 - 0,9
	Elevação de tensão	30 ciclos - 3 s	1,1 - 1,4
Temporária	Interrupção	3 s - 1 min	< 1,0
	Afundamento de tensão	3 s - 1 min	0,1 - 0,9
	Elevação de tensão	3 s - 1 min	1,1 - 1,2

De acordo com a Tabela 4.3, as variações de tensão de curta duração podem ser subdivididas em alterações instantâneas, momentâneas e temporárias, dependendo da duração do fenômeno.

4.3.1 Interrupção

Uma interrupção ocorre quando a tensão de suprimento decresce a um valor inferior a 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 min. Esse tipo de evento pode ser resultado da ocorrência de uma falta no sistema de potência, falhas de equipamentos ou mau funcionamento dos sistemas de controle (DUGAN *et al.*, 2003).

Em sistemas de transmissão de energia elétrica, a ocorrência de uma interrupção de tensão é comum após a atuação do sistema de proteção na eliminação de uma falta no sistema supridor, desde que o único fluxo de potência seja via LT com falta.

4.3.2 Elevação de tensão

Uma elevação de tensão é caracterizada por um aumento no valor eficaz da tensão entre 1,1 e 1,8 pu, na frequência fundamental, com duração típica de 0,5 ciclos a 1 min. Esse fenômeno pode ser causado pela saída de grandes cargas ou pela energização de grandes bancos de capacitores. No entanto, ele é normalmente, associado às condições de falta em LT, especialmente nas fases sãs durante uma falta monofásica (DUGAN *et al.*, 2003).

4.3.3 Afundamento de tensão

Um afundamento de tensão é caracterizado por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração típica de 0,5 ciclos a 1 min. Em sistemas de transmissão de energia elétrica, este tipo de distúrbio está associado a faltas em LT, mas também pode ser causado pela energização de cargas pesadas (DUGAN *et al.*, 2003).

Dependendo da distância da falta e das condições do sistema, uma falta pode dar origem a um afundamento de tensão nas fases envolvidas com a falta, uma elevação de tensão nas fases sãs ou até mesmo, uma interrupção de tensão após a eliminação da falta. No entanto, devido ao acoplamento magnético existente entre as LT, a ocorrência de uma falta provoca normalmente, afundamentos de tensão nas linhas circunvizinhas, especialmente em linhas paralelas.

Na Figura 4.6 apresentam-se os sinais de tensão e corrente referentes a uma falta monofásica real do tipo BT⁵. Essa falta ocasionou um afundamento de tensão em uma LT paralela⁶, cujos sinais de tensão e corrente são apresentados na Figura 4.7.

Os gráficos ilustrados na Figura 4.6 comprovam a ocorrência de um afundamento de tensão na fase envolvida com a falha durante o curto-circuito, enquanto que na Figura 4.7, percebe-se um afundamento de tensão na fase B, durante o período no qual o sistema elétrico ficou sob influência da falta. Após a eliminação da falta, a LT é isolada temporariamente do sistema e o fluxo de potência é redistribuído entre as LT sãs.

4.4 ENERGIZAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A energização de uma LT é uma manobra (operação de chaveamento) típica efetuada por disjuntores, através do fechamento dos seus contatos. Quatro tipos de registros oscilográficos podem ser obtidos mediante as manobras de energização em uma LT, dependendo do terminal (extremidade) da linha que está sendo energizado e do terminal da linha que está sendo monitorado por um RDP.

⁵Distúrbio ocorrido na LT 05L8_AGD-RCD, em 12 de janeiro de 2005, às 11 h, 19 min e 56 seg.

⁶Distúrbio ocorrido na LT 05L9_AGD-RCD, em 12 de janeiro de 2005, às 11 h, 19 min e 56 seg.

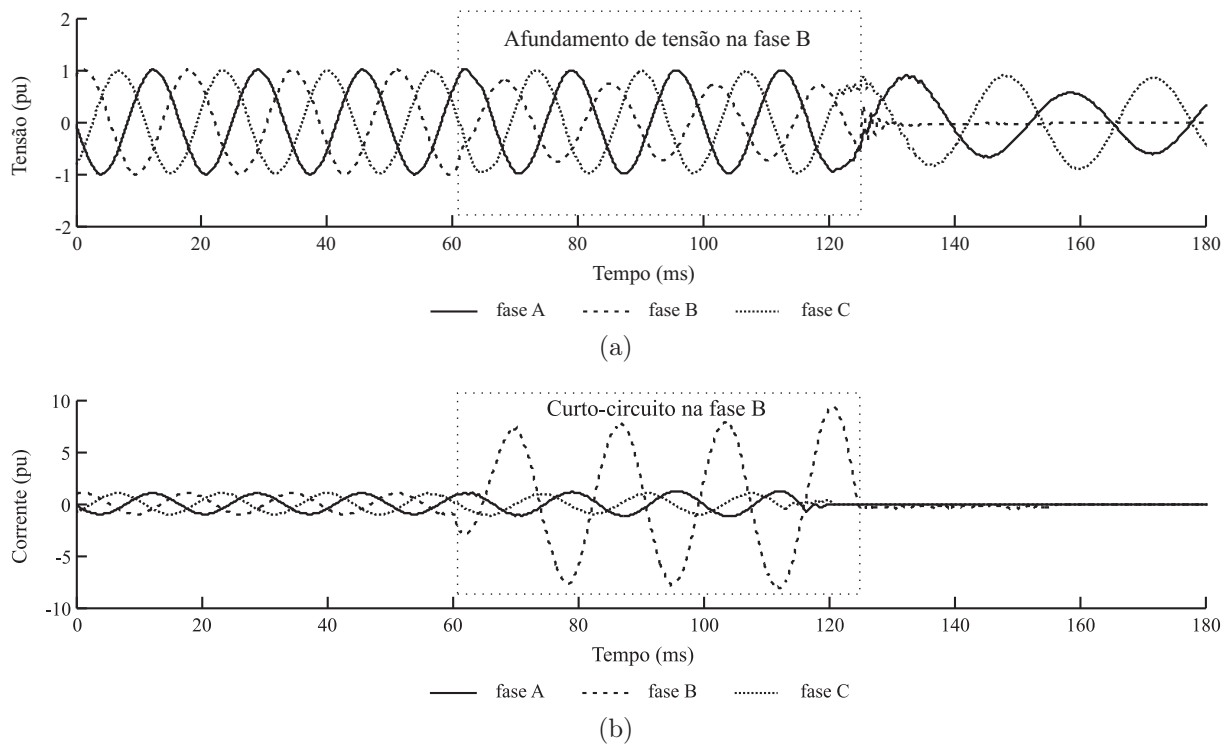


Figura 4.6. Registro oscilográfico com falta monofásica na fase B: (a) tensões; (b) correntes.

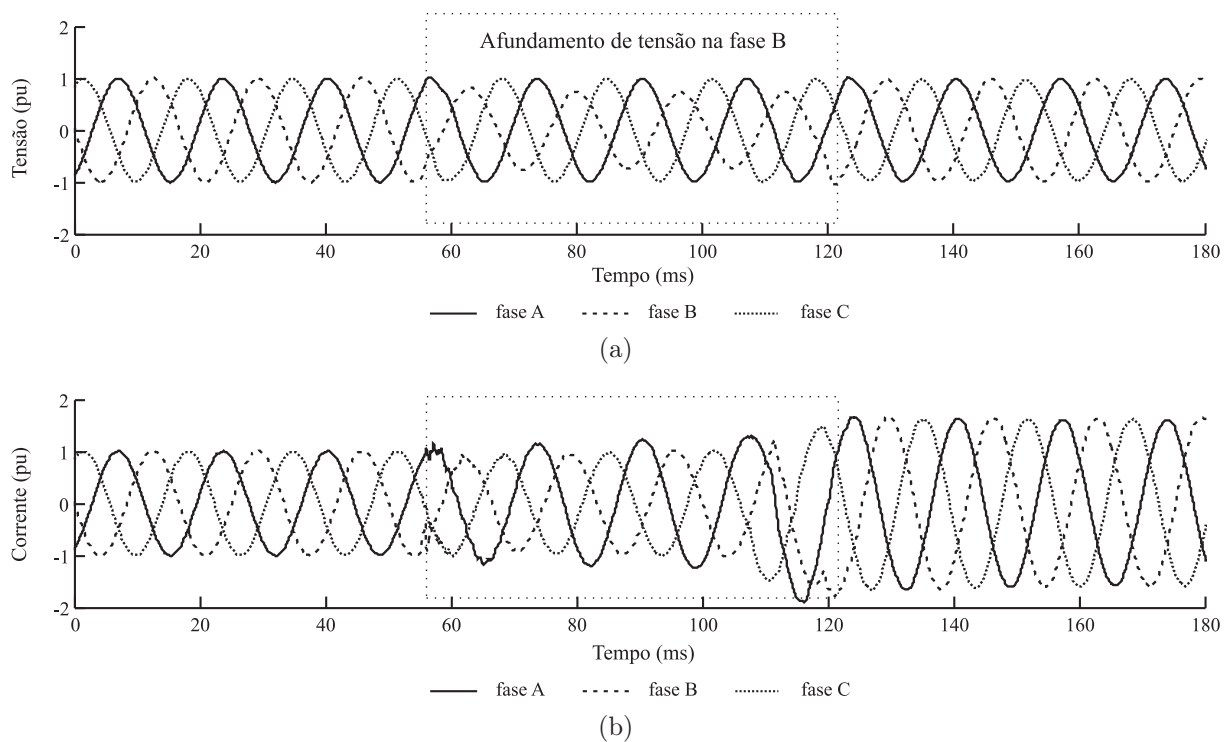


Figura 4.7. Registro oscilográfico com afundamento de tensão devido a uma falta em LT paralela: (a) tensões; (b) correntes.

Na Figura 4.8 apresenta-se um sistema simplificado, representado por uma LT com os seus terminais em aberto. Cada extremidade da LT é monitorada por um RDP (RDP1 e RDP2) e a energização dos terminais 1 e 2 pode ser realizada através dos disjuntores D1 e D2, respectivamente.

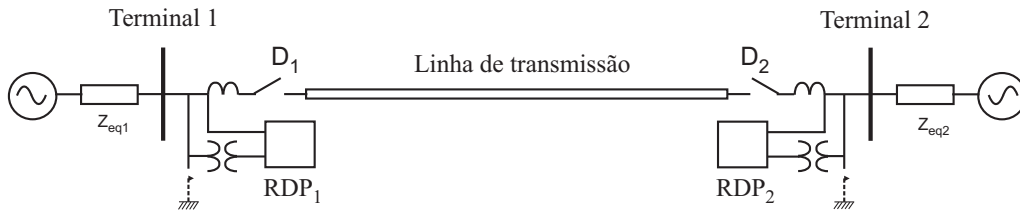


Figura 4.8. Representação de uma LT com os terminais em aberto.

A seguir, apresentam-se as nomenclaturas referentes aos possíveis registros oscilográficos obtidos a partir das duas operações de energização da LT da Figura 4.8:

1. Energização da LT através do Terminal 1:

- (a) E_{LRa} : Energização do terminal local (Terminal 1) com o terminal remoto (Terminal 2) em aberto. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP1.
- (b) E_{RLa} : Energização do terminal remoto (Terminal 1) com o terminal local (Terminal 2) em aberto. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP2.

2. Energização da LT através do Terminal 2:

- (a) E_{RLf} : Energização do terminal remoto (Terminal 2) com o terminal local (Terminal 1) fechado. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP1.
- (b) E_{LRf} : Energização do terminal local (Terminal 2) com o terminal remoto (Terminal 1) fechado. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP2.

onde: E - Energização; L - Terminal local; R - Terminal remoto; a - Aberto; f - Fechado.

Na Figura 4.9 apresentam-se os registros oscilográficos referentes a uma energização de uma LT⁷, obtidos através de RDP instalados em suas extremidades.

Na energização do tipo E_{LRa} (Figura 4.9(a)), durante o tempo no qual a LT está desenergizada (primeiros ciclos), as amostras de corrente coletadas pelo RDP têm amplitude iguais a zero. No entanto, os valores de pico das tensões podem atingir algumas dezenas de kV devido ao acoplamento elétrico com outras LT do sistema. Imediatamente após a manobra de energização, transitórios oscilatórios são observados nos sinais de tensão e corrente com duração da ordem de alguns milissegundos (D'AJUZ *et al.*, 1987). Os fenômenos transitórios resultantes de manobras de energização dependem de diversas condições do sistema, como por exemplo, do ponto da onda de tensão em que o disjuntor é fechado e do comprimento da LT.

Após um transitório inicial com duração de poucos ciclos, o sistema entra em regime permanente. Nesse caso, a defasagem entre as tensões com as respectivas correntes de fase é de aproximadamente 90° , visto que a corrente que flui para a LT com uma extremidade em aberto é capacitiva (efeito capacitivo da LT em aberto).

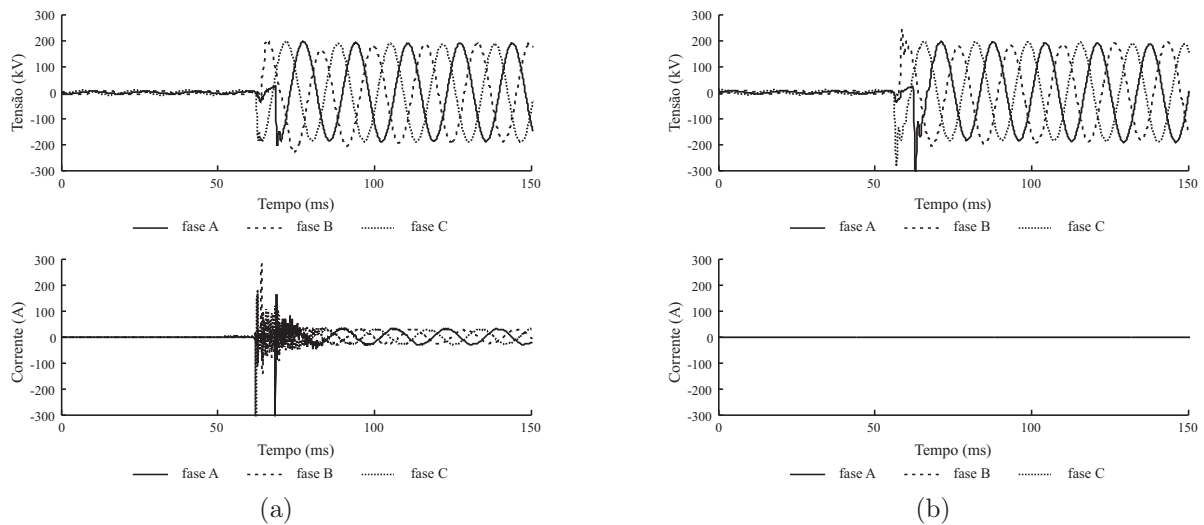


Figura 4.9. Energização de uma LT com um terminal em aberto: (a) E_{LRa} ; (b) E_{RLa} .

A energização do tipo E_{RLa} é obtida quando o ponto de medição do RDP é a extremidade da LT que está em aberto (terminal local). Portanto, mesmo após a energização no início da linha (terminal remoto), existe um período sem tensão e corrente, correspondente ao tempo de trânsito, até que as ondas cheguem ao terminal local.

⁷Distúrbio na LT 04C2_ITB-JDM/(JDM-ITB), em 07 de setembro de 2005, às 16 h, 32 min e 27 seg.

Um RDP é responsável pela coleta de dados das tensões e correntes em uma LT. Ele grava as informações em um registro oscilográfico quando alguma anormalidade é percebida, de modo que os dados armazenados retratam o funcionamento do sistema antes, durante e após o distúrbio. Um RDP que monitora um terminal de uma LT não tem necessariamente as mesmas configurações de outro RDP que monitora o outro terminal. Além disso, podem não estar sincronizados. Portanto, para um mesmo evento, não é recomendado comparar os relatórios de forma precisa, ou seja, levando em consideração o tempo de trânsito, os respectivos instantes inicial ou final obtidos de vários RDP.

Na energização da Figura 4.9, ao invés de um atraso no tempo, observa-se um avanço dos transitórios na energização do tipo E_{RLa} (Figura 4.9(b)) em relação aos respectivos transitórios observados na energização do tipo E_{LRa} (Figura 4.9(a)).

Da teoria de propagação de ondas em LT, os coeficientes de reflexão das tensões e correntes no terminal em aberto são 1 e -1, respectivamente. Segundo o princípio da superposição, duas ondas que viajam em sentidos contrários somam-se no ponto de encontro e continuam suas propagações independentemente (ARAÚJO; NEVES, 2005). Portanto, as correntes no terminal em aberto da LT devem ser nulas (Figura 4.9(b)), pois toda onda de corrente incidente é refletida com valor negativo. Por outro lado, toda onda de tensão incidente no terminal em aberto é refletida com valor positivo, o que implica na duplicação das tensões incidentes neste terminal. Porém, devido as perdas existentes na LT, o valor das tensões no terminal em aberto não são o dobro daquelas fornecidas na outra extremidade.

Na Figura 4.10 apresentam-se os registros referentes a uma energização em uma LT⁸, obtidos por dois RDPs instalados nos seus terminais.

Em uma energização do tipo E_{RLf} (Figura 4.10(a)), as correntes são capacitivas durante os primeiros ciclos, visto que a LT possui um terminal em aberto. Apenas após a energização do terminal em aberto, seguido por um período transitório, as correntes assumem seus valores de regime permanente, conforme a carga alimentada. Por outro lado, as tensões praticamente não sofrem alterações durante a operação de energização da LT.

⁸Distúrbio na LT 05L9_RCD-AGD/(AGD-RCD), em 28 de janeiro de 2005, às 15 h, 46 min e 54 seg.

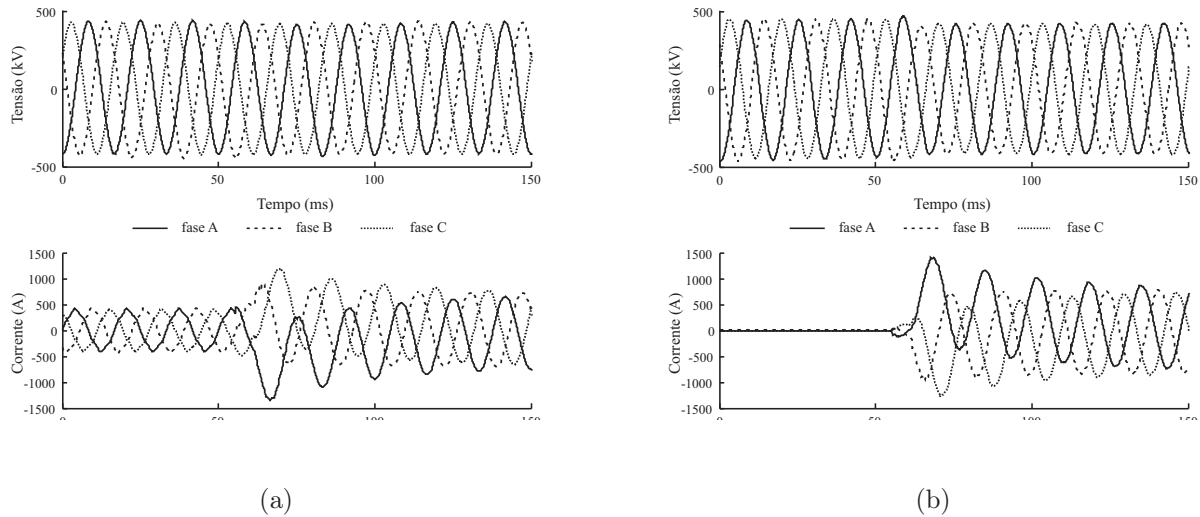


Figura 4.10. Energização de uma LT com um terminal energizado: (a) E_{RLf} ; (b) E_{LRf} .

Na energização do tipo E_{LRf} (Figura 4.10(b)), as correntes são nulas durante os primeiros ciclos, visto que o ponto de monitoramento é no terminal em aberto da LT. Apenas após a manobra de energização, seguido por um período transitório, as correntes assumem seus valores de regime permanente, conforme a carga alimentada. Por outro lado, as tensões nos primeiros ciclos no terminal em aberto são superiores às respectivas tensões na outra extremidade da LT. As tensões assumem os valores nominais apenas após a operação de energização.

4.5 RELIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Quando uma LT está operando em regime permanente e ocorre uma falta, os disjuntores devem atuar no sentido de isolar a seção em curto. Porém, os disjuntores normalmente aguardam um período de tempo (*tempo morto*) para efetuarem uma tentativa de religamento da LT, cujo sucesso depende de alguns fatores, tais como o caráter temporário ou permanente da falta (ZANETA Jr., 2003).

O período de tempo morto em um religamento tripolar é da ordem de 0,5 a 1,5 s (IEEE STD C37.104-2002, 2003). esse período é necessário para a completa extinção do arco elétrico e para que a carga armazenada na LT, chamada de *carga residual*, tenha sido totalmente amortecida.

Alguns registros oscilográficos reais (Figura 4.11) contemplam uma falta e um religamento⁹. No entanto, devido ao longo período de tempo morto após a abertura tripolar do disjuntor, os dados referentes à falta e ao religamento são geralmente armazenados em registros oscilográficos distintos. Nestas circunstâncias, a distinção entre energização e religamento é impraticável. Portanto, nessa dissertação um religamento de uma LT é tratado como uma energização.

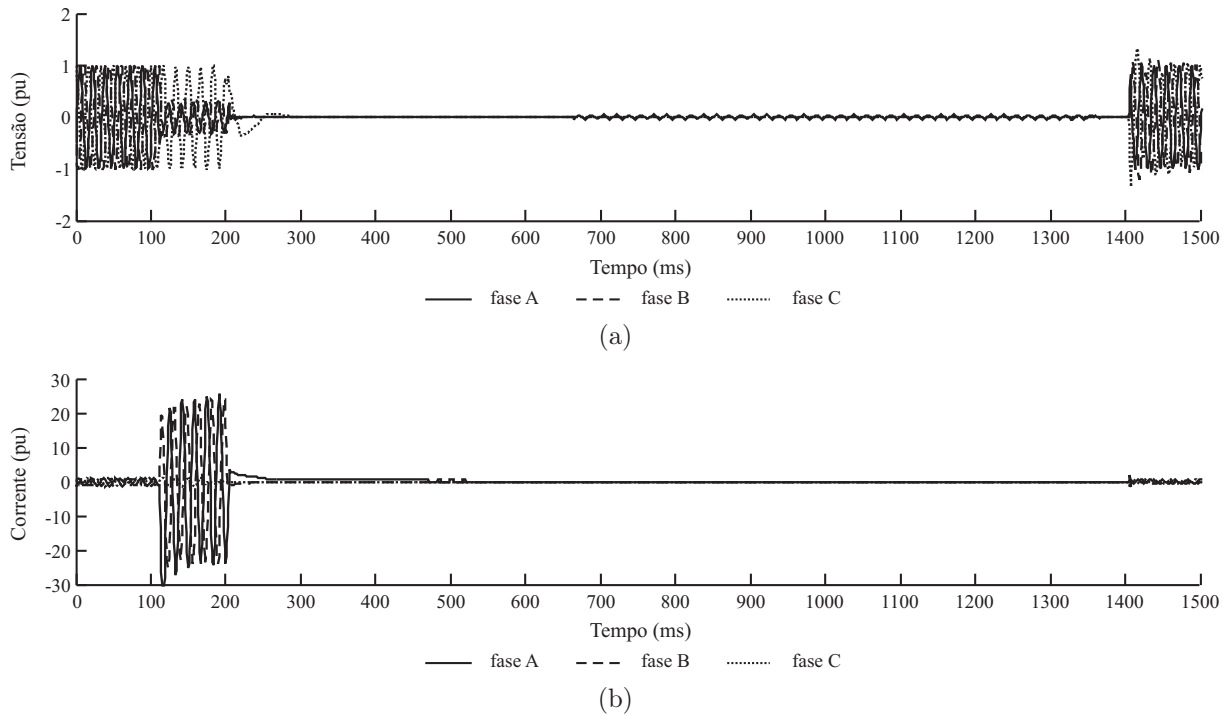


Figura 4.11. Registro oscilográfico contemplando uma falta bifásica seguido pelo religamento da LT: (a) tensões; (b) correntes.

4.6 DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O desligamento de uma LT é uma operação de chaveamento típica efetuada por disjuntores, através da abertura dos seus contatos. Da mesma forma que energizações em LT, quatro tipos de registros oscilográficos podem ser obtidos mediante as manobras de desligamento de uma LT, a depender do terminal a ser aberto por um disjuntor e do terminal a ser monitorado por um RDP.

Apresentam-se a seguir as nomenclaturas, conforme Figura 4.8, referentes aos possíveis registros oscilográficos obtidos a partir das duas operações de desligamentos da LT.

⁹Distúrbios obtidos na LT 04C4_BNB-MSB, em 07 de março de 2004, às 13 h, 39 min e 33 seg.

1. Desligamento da LT através do Terminal 2:

- (a) D_{RLf} : Desligamento do terminal remoto (Terminal 2) com o terminal local (Terminal 1) fechado. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP1.
- (b) D_{LRf} : Desligamento do terminal local (Terminal 2) com o terminal remoto (Terminal 1) fechado. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP2.

2. Desligamento da LT através do Terminal 1:

- (a) D_{LRa} : Desligamento do terminal local (Terminal 1) com o terminal remoto (Terminal 2) em aberto. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP1.
- (b) D_{RLa} : Desligamento do terminal remoto (Terminal 1) com o terminal local (Terminal 2) em aberto. Registro oscilográfico fornecido pelo RDP2.

onde: D - Desligamento; L - Terminal local; R - Terminal remoto; a - Aberto; f - Fechado.

O comportamento geral das tensões e correntes dos registros referentes ao desligamento é análogo aos registros referentes a energização. Porém, deve-se adotar um raciocínio inverso ao analisar os sinais provenientes do desligamento, pois o sentido das operações e o tipo de chaveamento são invertidos. Nas Figuras 4.12 e 4.13 apresentam-se registros oscilográficos reais de desligamento de uma LT¹⁰.

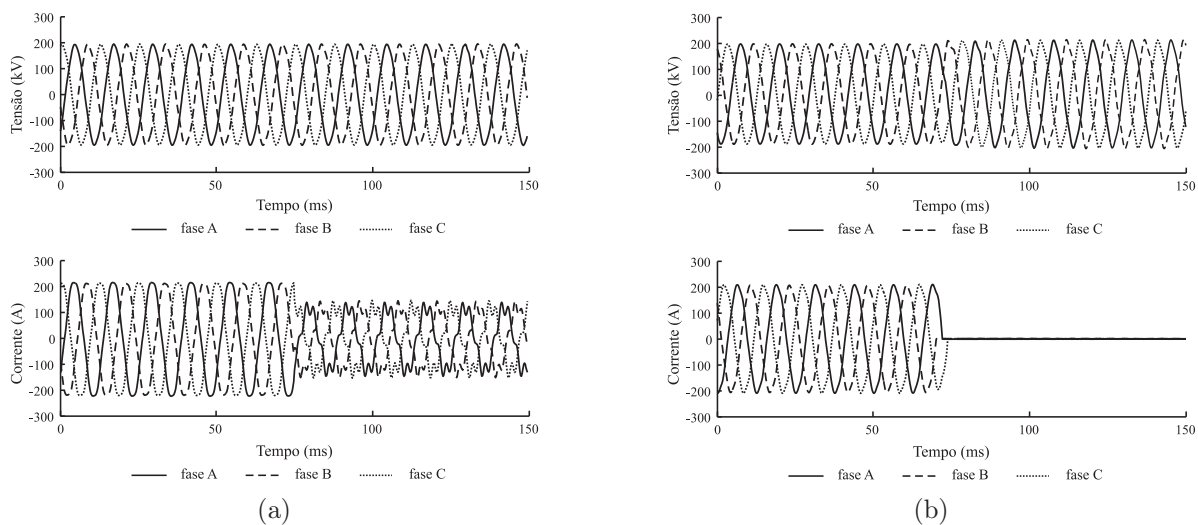


Figura 4.12. Desligamento de uma LT com um terminal energizado: (a) D_{RLf} ; (b) D_{LRf} .

¹⁰Distúrbios na LT 04V4_CGD-RCD/(RCD-CGD), em 6 de fevereiro de 2004, às 10 h, 25 min e 27 seg.

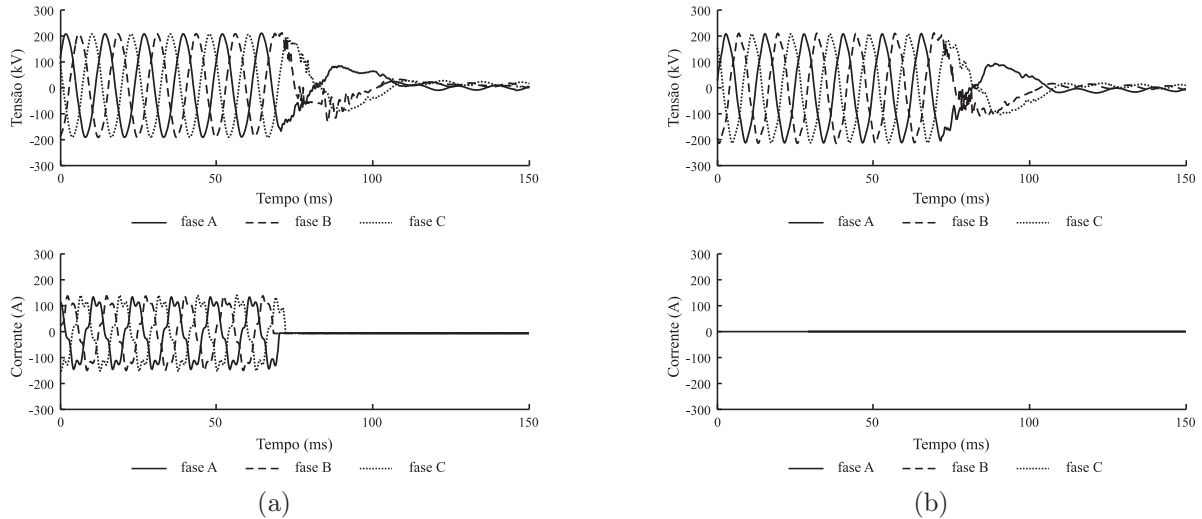


Figura 4.13. Desligamento de uma LT com um terminal em aberto: (a) D_{LRf} ; (b) D_{RLa} .

No desligamento do tipo D_{RLf} (Figura 4.12(a)), durante os primeiros ciclos, o sistema está operando em regime permanente conforme a carga alimentada. Após o desligamento do terminal remoto, as correntes passam a ser capacitivas, visto que a LT passa a ser vista como uma capacitância por esse terminal. Normalmente, os valores de pico das tensões não sofrem grandes alterações e não há incidência de transitórios severos durante o chaveamento.

No desligamento do tipo D_{LRf} (Figura 4.12(b)), durante os primeiros ciclos, antes do desligamento, as tensões e correntes estão em regime permanente, conforme a carga alimentada. Após o desligamento da LT, o terminal monitorado fica em aberto e os índices de reflexão das tensões e correntes incidentes na descontinuidade são 1 e -1, respectivamente. Portanto, as correntes se anulam e as tensões passam a ter um valor de pico maior que o valor nominal.

No desligamento do tipo D_{LRa} (Figura 4.13(a)), durante o período no qual a LT está com o terminal remoto em aberto, as amostras de corrente coletadas pelo RDP no terminal local são puramente capacitivas. Após a manobra de desligamento da LT, as correntes no ponto de monitoramento se anulam. No entanto, devido ao acoplamento elétrico com outras LT do sistema elétrico, os valores de pico das tensões podem atingir algumas dezenas de kV.

Para o desligamento do tipo D_{RLa} (Figura 4.13(b)), antes da manobra de chaveamento, as tensões no ponto de monitoramento (terminal em aberto) possuem valores de pico superiores às respectivas tensões no outro terminal. Após o desligamento, os valores de pico das tensões podem atingir algumas dezenas de kV devido ao acoplamento elétrico com outras LT. Por outro lado, as correntes são nulas em todo o registro.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os RDP utilizados para a coleta de dados possuem uma taxa de amostragem máxima de 15360 Hz. Pelo critério de Nyquist, a componente de maior frequência nos sinais de tensão e corrente é 7680 Hz. Portanto, apenas os transitórios oscilatórios de baixa e média frequência (Tabela 4.1) serão considerados.

A análise de distúrbios realizada nesta dissertação considera apenas os distúrbios listados abaixo. Apenas a falta será analisada, sendo os demais distúrbios considerados como *registros sem falta*.

1. Transitórios de chaveamento: Essa terminologia é utilizada na dissertação para transitórios oscilatórios originados de certas operações de chaveamentos, como por exemplo, chaveamento de bancos de capacitores. Transitórios oscilatórios decorrentes de chaveamentos para eliminar faltas, energizar e desligar LT não se enquadram nesta categoria.
2. Falta: Indica um curto-circuito em uma LT.
3. Afundamento de tensão: Essa terminologia é utilizada na dissertação para afundamento de tensão em uma LT devido a uma falta em outra linha ou devido ao chaveamento de uma carga pesada.
4. Energização de LT.
5. Desligamento de LT.

MÉTODO PROPOSTO

Neste capítulo apresenta-se a descrição do método proposto para o diagnóstico de faltas em LT. O objetivo é realizar uma pré-análise e triagem dos registros oscilográficos capturados pelos RDP, identificando os registros com falta e emitindo o relatório com o seu diagnóstico.

O método proposto foi integrado ao sistema Wavan[©] (Apêndice C), sendo dividido em três módulos (Figura 5.1): detecção de faltas, estimação de sua duração e classificação de faltas.

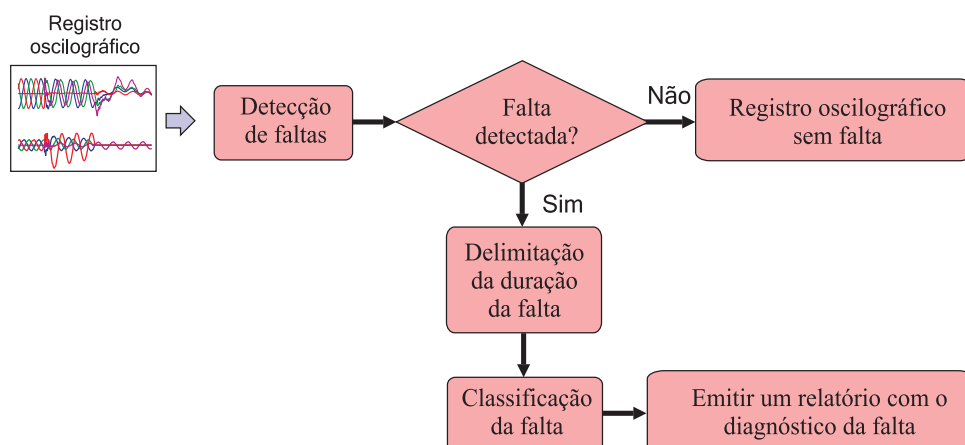


Figura 5.1. Diagrama simplificado do método proposto.

5.1 MÓDULO DE DETECÇÃO DE FALTAS

Inicialmente, os campos dos registros correspondentes aos canais analógicos são lidos. Em seguida, os sinais de tensão e corrente são normalizados e aplica-se um estágio da TWD apenas às correntes de fase, obtendo-se os coeficientes wavelet. Calcula-se a *energia janelada* desses coeficientes e após a avaliação de um conjunto de regras, detecta-se ou não uma falta. Caso uma falta não seja detectada, o algoritmo proposto é finalizado. Caso contrário, o registro com falta é avaliado pelas etapas de delimitação da duração e classificação de falta.

5.1.1 Normalização dos Sinais de Tensão e Corrente

O esquema de normalização é empregado às tensões e correntes visando uniformização dos critérios adotados na análise dos registros. Na forma como foi concebida, essa etapa preserva a forma de onda dos sinais e mantém inalterada a relação entre as correntes e a relação entre as tensões. Desta forma, registros provenientes de LT diferentes podem ser avaliados indistintamente, independente dos diversos níveis de tensão e corrente.

Quando um RDP é disparado, os sinais de tensão e corrente são coletados por um período que normalmente, contempla todo o distúrbio. Um período de pré-distúrbio e possivelmente, um período de pós-distúrbio também são registrados. Após uma análise exaustiva dos registros oscilográficos, observou-se que normalmente, os períodos de pré e/ou pós-distúrbio retratam o sistema em regime permanente.

A normalização das tensões e correntes é realizada através de um valor base de tensão e corrente, respectivamente, obtidos no primeiro ou no último ciclo do registro. O valor base de tensão (e corrente) é a média entre as tensões (e correntes) máximas de fase, no ciclo escolhido.

Na tentativa de evitar alguns problemas, tais como a divisão dos sinais por um valor base igual a zero, a escolha entre o primeiro e o último ciclo para o cálculo dos valores base de normalização segue alguns critérios:

1. A escolha do primeiro ciclo será descartada se as correntes e/ou tensões forem nulas. Portanto, em energizações do tipo E_{LRa} , E_{RLa} e E_{LRf} , este ciclo não é utilizado.
2. A escolha do último ciclo será descartada se as correntes e/ou tensões forem nulas. Portanto, em faltas e desligamentos do tipo D_{LRf} , D_{LRa} e D_{RLa} , este ciclo não é utilizado.
3. Caso os dois ciclos sejam pré-selecionados, então aquele que possuir correntes capacitivas terá menor prioridade de escolha. Por exemplo, na energização E_{RLf} o último ciclo será selecionado, enquanto que no desligamento D_{RLf} o primeiro ciclo será escolhido.
4. Permanecendo os dois ciclos pré-selecionados após todas as regras, então o primeiro ciclo terá prioridade de escolha. Por exemplo, escolhe-se o primeiro ciclo para normalização em registros sem distúrbios, com afundamento de tensão ou transitórios de chaveamento.

5.1.2 Aplicação da TWD

Conforme a teoria da decomposição multiresolucional de um sinal, nas escalas de alta resolução, a wavelet mãe é mais localizada no tempo e oscila rapidamente em um curto período de tempo. Devido às características particulares dos transitórios em uma falta, selecionou-se a primeira escala para realizar a detecção. Com base na revisão bibliográfica, utilizou-se a wavelet mãe db4.

Após normalização dos sinais, aplica-se um estágio da TWD às correntes de fase (Figura 3.6).

5.1.3 Energia Janelada dos Coeficientes Wavelet

A seguinte equação é uma versão modificada da energia concentrada dos coeficientes wavelet da escala j ($\sum_{k=1}^{N_s/2^j} |d_j(k)|^2$ na equação (3.17)), a qual foi obtida confinando-se um trecho específico dos coeficientes wavelet nessa escala:

$$e_{k_1}^{k_2} = \sum_{k=k_1}^{k_2} |d_j(k)|^2, \quad (5.1)$$

sendo $1 < k_1 < k_2 < N_s/2^j$; $N_s/2^j$ o número de amostras dos coeficientes wavelet da escala j .

A equação (5.1) pode ser utilizada em aplicações que requerem análise da energia dos coeficientes wavelet, em intervalos fixos (janelas), percorrendo todas as amostras dos coeficientes wavelet da escala j . Uma janela de dados do sinal original, com N_w amostras, possui $N_w/2^j$ amostras no domínio wavelet (escala j), devido a subamostragem por dois a cada aplicação da TWD. Desta forma, define-se a energia janelada dos coeficientes wavelet na escala j como:

$$\mathcal{E}_j(k) = \sum_{n=k}^{k+N_w/2^j} d_j^2(n), \quad (5.2)$$

com $k = \{1, 2, \dots, \frac{N_s-N_w}{2^j} - 1\}$.

Na Figura 5.2(a) apresenta-se um sinal com N_s amostras, cujos coeficientes wavelet na primeira escala são ilustrados na Figura 5.2(b). A energia janelada, da primeira escala, obtida através da equação (5.2) é apresentada na Figura 5.2(c). O cálculo da energia janelada foi realizado através de janelas com um número de coeficientes equivalente a um ciclo do sinal original.

Conforme os gráficos apresentados na Figura 5.2, os coeficientes wavelet possuem $N_s/2$ amostras e sua respectiva energia janelada possui $N_s/2 - N_w/2 - 1$ amostras, pois o último coeficiente wavelet não é usado, descartando assim o efeito de borda proveniente da aplicação da TWD. O termo $N_w/2$ está relacionado com o processo de janelamento.

No método de detecção de falta proposto, utiliza-se a energia janelada dos coeficientes wavelet da primeira escala, para cada uma das correntes de fase, calculada conforme equação (5.2), com $j = 1$.

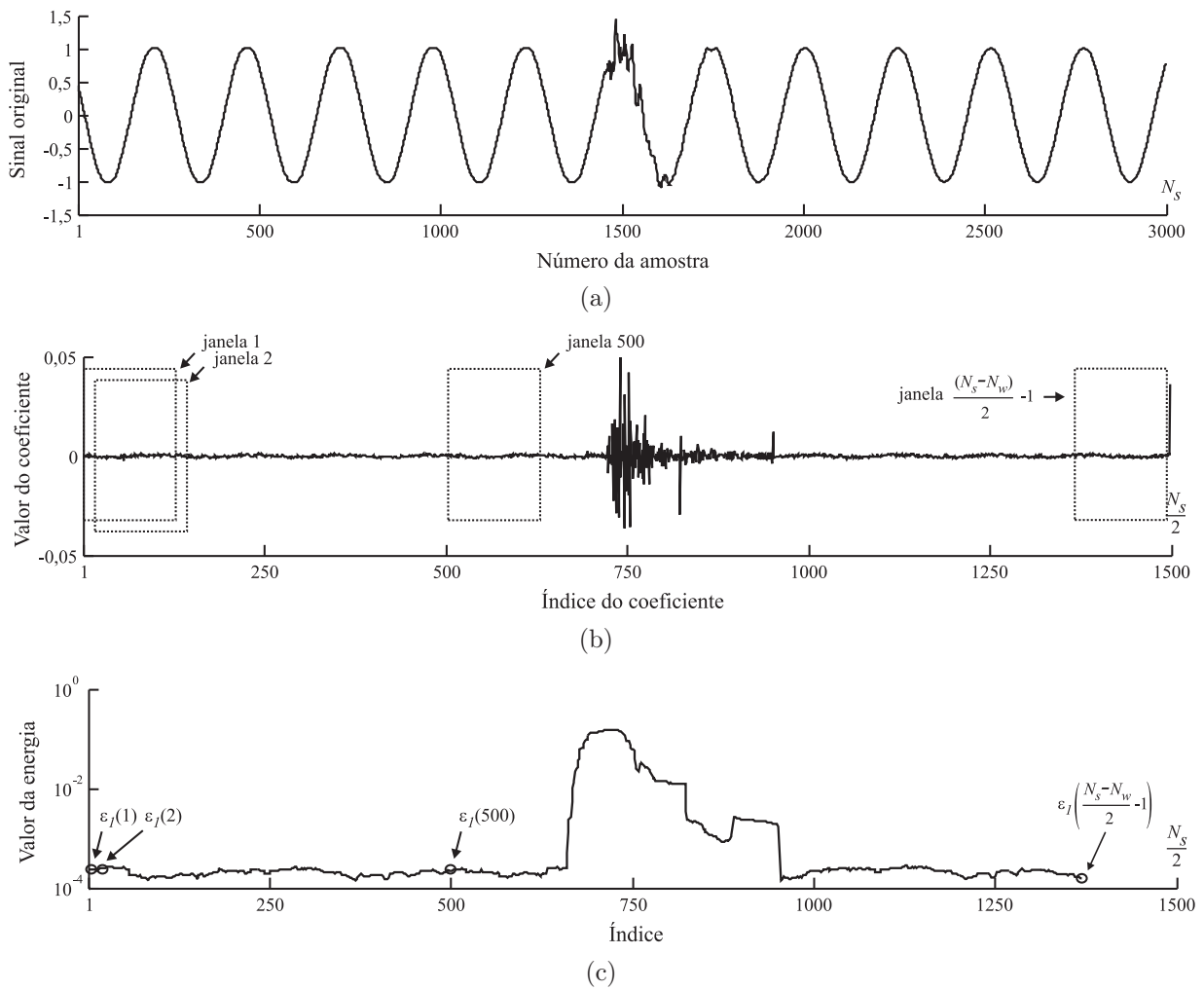


Figura 5.2. Processo de janelamento: (a) sinal original; (b) coeficientes wavelet; (c) energia janelada.

5.1.4 Elaboração das Regras de Detecção de Falhas

5.1.4.1 Registros Oscilográficos sem Distúrbios

Na Figura 5.3 apresentam-se as correntes de fase de um registro sem distúrbios¹, cujas energias janeladas dos coeficientes wavelet da primeira escala, são ilustradas na Figura 5.4.

Estudo minucioso das características obtidas das curvas de energia janelada das correntes sem distúrbios, mostraram que:

1. As curvas de energia janelada mantêm-se praticamente constantes.
2. As pequenas variações de energia, na primeira escala, é conseqüência da presença de ruídos de natureza elétrica nas correntes.
3. Observa-se que as energias se concentram em uma faixa de energia que varia de E_1 a E_2 .

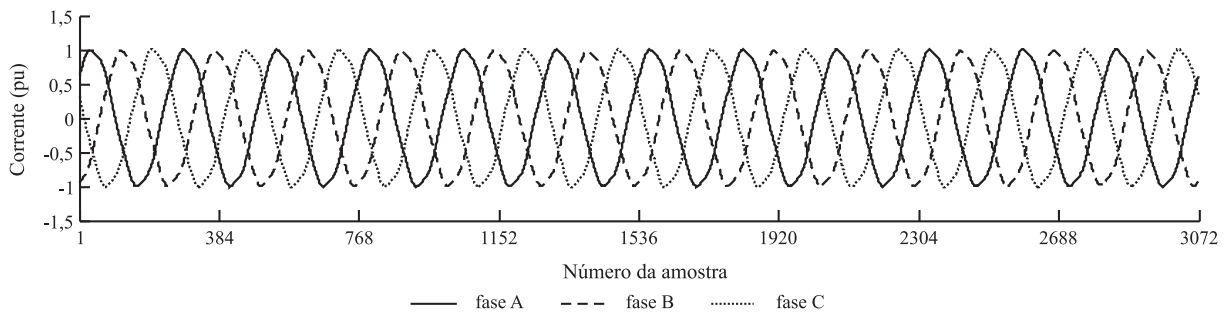


Figura 5.3. Correntes de fase de um registro oscilográfico sem distúrbios.

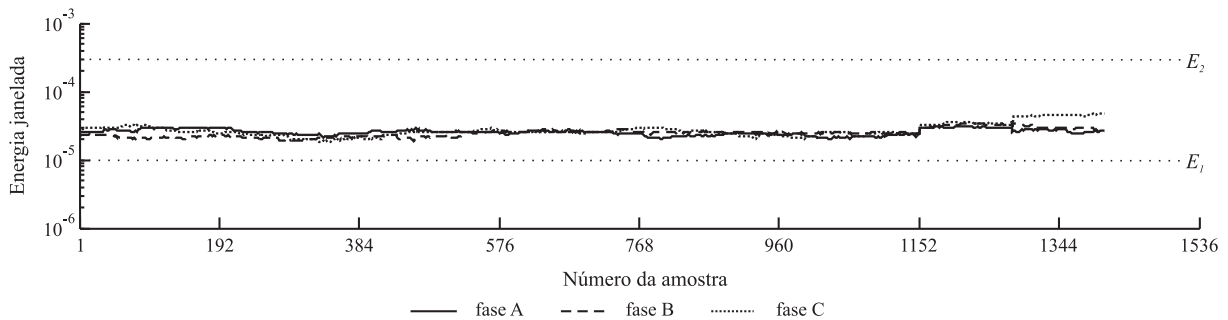


Figura 5.4. Energia janelada dos coeficientes wavelet, na primeira escala, para cada corrente.

¹Registro coletado na LT 04V4_CGD-NTD, em 25 de agosto de 2004, às 02 h e 21 seg.

5.1.4.2 Influência dos Transitórios Oscilatórios na Energia Janelada

Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas de energia referentes a um transitório de chaveamento², uma falta CT³, um afundamento de tensão⁴ e uma energização de uma LT⁵.

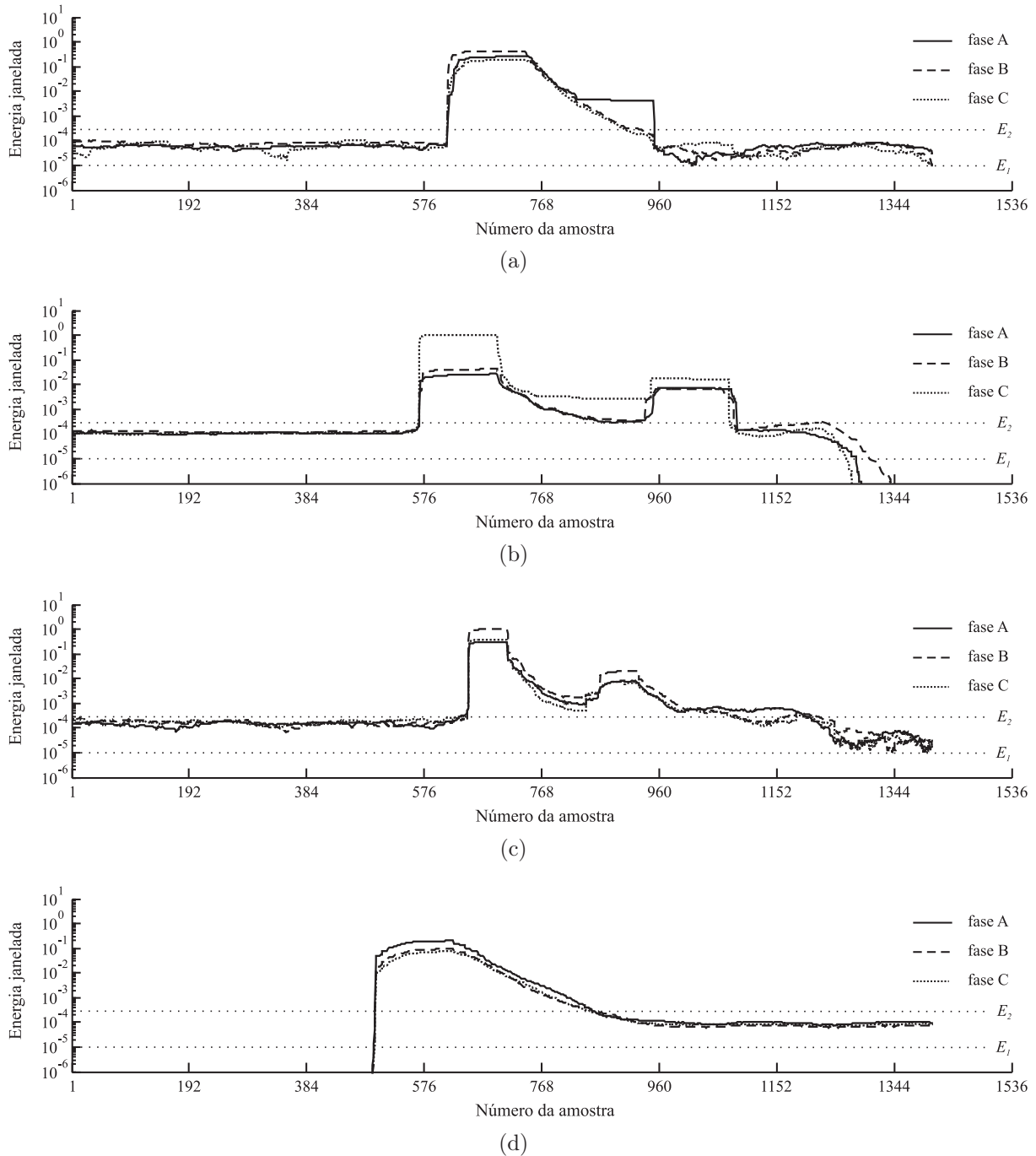


Figura 5.5. Energia janelada dos coeficientes wavelet das correntes, na primeira escala: (a) transitórios de chaveamento; (b) falta BT; (c) afundamento de tensão; (d) energização E_{LRa} .

²Registro coletado na LT 03L1_CGD-SCD, em 29 de dezembro de 2004, às 18 h, 17 min e 23 seg.

³Registro coletado na LT 04S7_ITB-PAU, em 27 de julho de 2003, às 17 h, 58 min e 20 seg.

⁴Registro coletado na LT 05V1_ULG-MLG, em 05 de outubro de 2004, às 10 h, 23 min e 29 seg.

⁵Registro coletado na LT 04V4_CGD-LTD, em 29 de fevereiro de 2004, às 18 h, 45 min e 11 seg.

Fenômenos transitórios encontrados nos sinais de tensão e corrente em um registro oscilográfico com distúrbio normalmente, são compostos por componentes de alta frequência. Desta forma, os coeficientes wavelet das correntes, na primeira escala, referentes aos transitórios, apresentam amplitude elevada, quando comparados com a amplitude dos coeficientes relacionados ao regime permanente. Como resultado, as curvas de energia das correntes sofrem um aumento, em amplitude, com uma duração equivalente ao do distúrbio.

5.1.4.3 Variáveis Usadas na Detecção de Faltas

Na Figura 5.6 apresenta-se a energia janelada típica de um distúrbio. Os principais parâmetros e características utilizados na detecção são descritos a seguir.

1. E_1 e E_2 : delimitam a região que normalmente, contempla os pontos de energia referentes ao regime permanente.
2. E_{max} : maior valor de energia durante o distúrbio.
3. ΔE : variação de energia em cinco amostras consecutivas, contabilizada a partir da amostra k . Observa-se que a maior variação de energia é obtida nas amostras referentes ao início do distúrbio.
4. E_{pos} : energia média em um ciclo, calculada imediatamente após o distúrbio.
5. k_1 : amostra relacionada ao instante inicial do distúrbio.
6. k_2 : amostra relacionada ao instante final do distúrbio.
7. $\Delta k = k_2 - k_1$: duração do distúrbio.

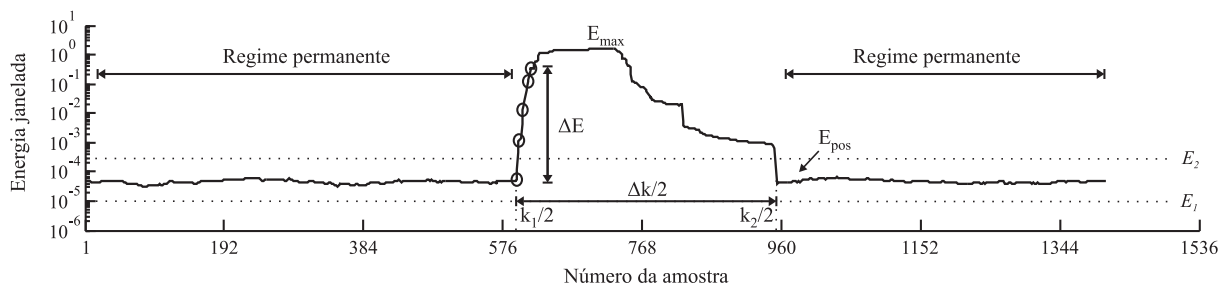


Figura 5.6. Parâmetros para a detecção de distúrbios.

5.1.4.4 O Critério do Valor Máximo de Energia

Na Figura 5.7 apresentam-se os sinais de tensão e corrente de um registro oscilográfico⁶, cuja LT monitorada estava com o terminal remoto em aberto. O registro apresentado não se configura como um distúrbio. Entretanto, todos os valores da energia janelada (Figura 5.8) são superiores ao limiar de energia E_2 . Portanto, valores de energia ultrapassando esse limiar não garantem necessariamente, a presença de distúrbio em um registro.

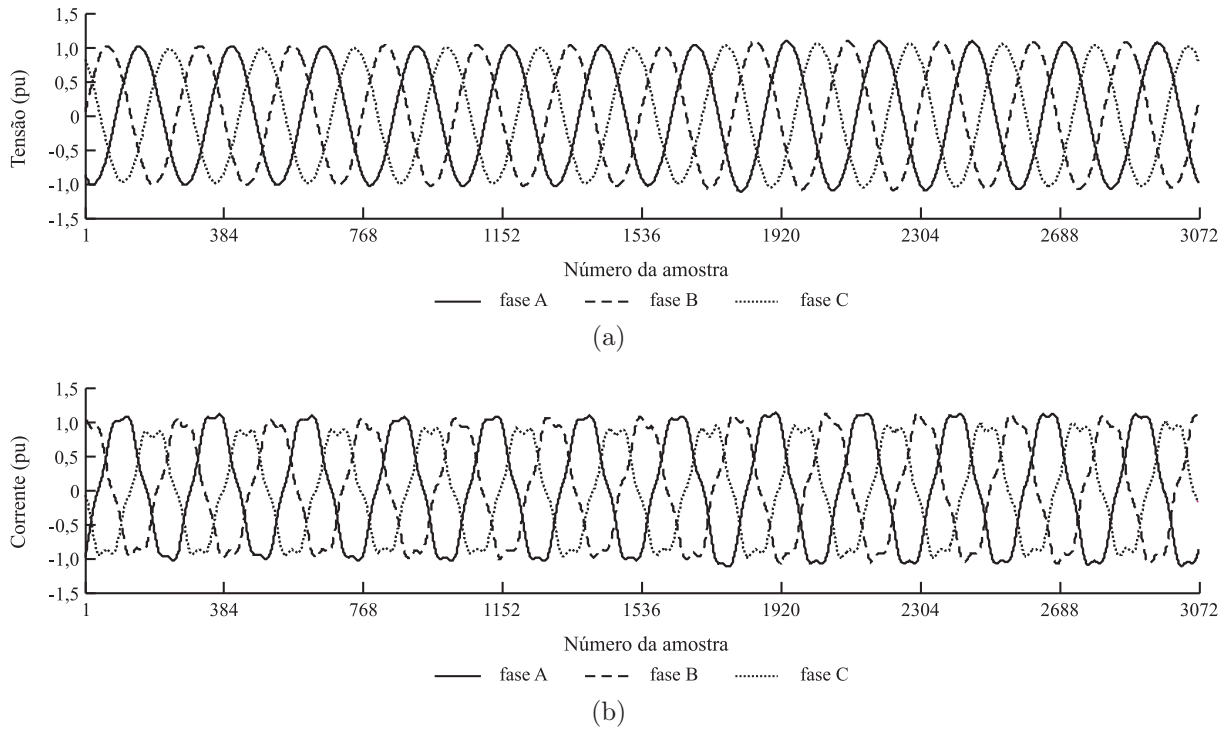


Figura 5.7. Registro oscilográfico, sem distúrbios, coletado em uma LT com o terminal remoto em aberto: (a) tensões; (b) correntes.

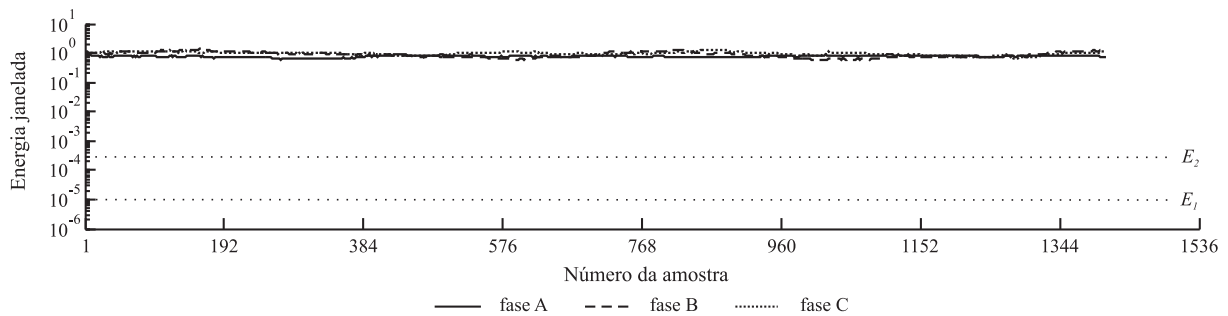


Figura 5.8. Energia janelada dos coeficientes wavelet, na primeira escala, para cada corrente.

⁶Registro coletado na LT 04V4_CGD-NTD, em 05 de outubro de 2005, às 13 h, 52 min e 48 seg.

5.1.4.5 O Critério da Variação Brusca de Energia

A variação brusca de energia em uma região correspondente ao início de uma perturbação, configura-se como uma característica importante das curvas de energia janelada (Figura 5.5). Em alguns registros oscilográficos com distúrbio, percebe-se que a energia em regime permanente, antes e/ou após o evento, pode ser aproximadamente igual ao limiar E_2 (Figura 5.5(c)), podendo ultrapassar esse limiar em um instante que não corresponda ao distúrbio. Também existem casos em que a energia em regime permanente é sempre superior a esse limiar (Figura 5.8). Portanto, a avaliação da variação de energia se configura como um procedimento importante para detecção de faltas.

O método proposto avalia a variação de energia em cinco amostras consecutivas. ΔE na amostra k é definida por:

$$\Delta E = \max\{\mathcal{E}_1(k), \mathcal{E}_1(k+1), \dots, \mathcal{E}_1(k+4)\} - \mathcal{E}_1(k), \quad (5.3)$$

sendo: $\mathcal{E}_1(k)$ o valor de energia na amostra k ; $\max\{\cdot\}$ um operador que retorna o valor máximo de energia nas amostras consideradas.

As regras de detecção identificam o instante k_1 , caso ΔE ultrapasse um valor mínimo de variação de energia (ΔE_{min}).

5.1.4.6 O Critério da Duração Mínima e da Energia Pós-distúrbio

Após identificação da variação brusca de energia ($\Delta E \geq \Delta E_{min}$), o instante inicial do evento k_1 é localizado. No entanto, o distúrbio só é confirmado após verificação de sua duração (Δk).

Após o distúrbio, espera-se que os sinais de corrente convirjam para o valor de regime permanente, que de acordo com a Figura 5.6, inicia-se na amostra $k_2/2$ na curva de energia. Normalmente, em registros com falta, a energia pós-distúrbio é inferior a E_1 , enquanto que nos demais distúrbios, varia entre E_1 e E_2 . Diante do exposto, o método proposto considera o término do distúrbio quando pelo menos um ciclo pós-distúrbio estiver em regime permanente.

A duração típica de uma falta é superior a 2,5 ciclos na frequência fundamental (ANDERSON, 1999). Como a duração do distúrbio através das curvas de energia possui um ciclo a mais (devido ao processo de janelamento), é necessário

$$\Delta k \geq 3,5\Delta k_{ciclo}, \quad (5.4)$$

sendo: Δk_{ciclo} o número de amostras em um ciclo e $\Delta k_{min} = 3,5\Delta k_{ciclo}$ o número mínimo de amostras durante uma falta.

5.1.4.7 Sumário do Método Proposto

As regras utilizadas no módulo de detecção de falta são as seguintes:

1. Aplique as regras de normalização aos sinais de corrente e tensão do registro oscilográfico.
2. Aplique um estágio da TWD às correntes de fase.
3. Calcule as energias janeladas dos coeficientes wavelet das correntes de fase ($\mathcal{E}_A(k)$, $\mathcal{E}_B(k)$ e $\mathcal{E}_C(k)$), conforme equação (5.2).
4. Se $E_{max} < E_2$, então o registro não corresponde a uma falta (interrompa as análises).
5. Senão, faça $k = 1$.
6. Identifique se existe algum $\Delta E(k) \geq \Delta E_{min}$, para as energias $\mathcal{E}_A(k)$, $\mathcal{E}_B(k)$ e $\mathcal{E}_C(k)$, identificando então k_1 .
7. Se k_1 foi obtido, então identifique de k_1 até a última amostra, um ciclo de energia janelada em regime permanente, obtendo E_{pos} , k_2 e $\Delta k = k_2 - k_1$.
 - (a) Se $\Delta k \geq \Delta k_{min}$ e $E_{pos} < E_1$, então a falta foi detectada (interrompa as análises).
 - (b) Senão, faça $k = k_2$ e volte ao passo 6.
8. Senão, o registro não corresponde a uma falta (interrompa as análises).

5.1.5 Estimação das Variáveis de Detecção

5.1.5.1 Registros Oscilográficos Reais

A extração de características e a elaboração das regras, utilizadas na etapa de detecção de faltas, foram baseadas em registros oscilográficos reais obtidos em diversas LT do sistema CHESF.

Na Tabela 5.1 apresenta-se a quantidade e o tipo de registros avaliados na elaboração das regras. Os registros foram coletados em diversas partes do sistema de potência, no período de 2003 a 2005, contemplando os níveis de tensão de 138, 220 e 500 kV, com frequências de amostragem de 1200, 2400 e 15360 Hz.

Tabela 5.1. Tipo e quantidade de registros avaliados para a elaboração das regras.

Registros oscilográficos	Quantidade de registros avaliados	
sem distúrbios	40	
com transitórios de chaveamento	33	
com falta	33	
com afundamento de tensão	50	
com energização	E_{LRa}	10
	E_{RLa}	5
	E_{RLf}	5
	E_{LRf}	5
com desligamento	D_{RLf}	1
	D_{LRf}	5
	D_{LRa}	10
	D_{RLa}	4

5.1.5.2 Registros Oscilográficos Simulados

Como a resistência, o ângulo de incidência e a distância de falta são parâmetros importantes, simularam-se registros oscilográficos com falta, visando avaliação do efeito desses parâmetros no desempenho do módulo de detecção.

Escolheu-se a LT 04V4_CGD-NTD de 230 kV e 180 km, pertencente ao *subsistema leste* de transmissão da CHESF (Figura 5.9). O sistema foi modelado e simulado utilizando-se o ATP (LEUVEN EMTP CENTER, 1987), considerando-se parâmetros distribuídos e constantes com a frequência e o nível máximo de carga do sistema (BRITO *et al.*, 2004). Considerou-se ponto de monitoramento na subestação CGD.

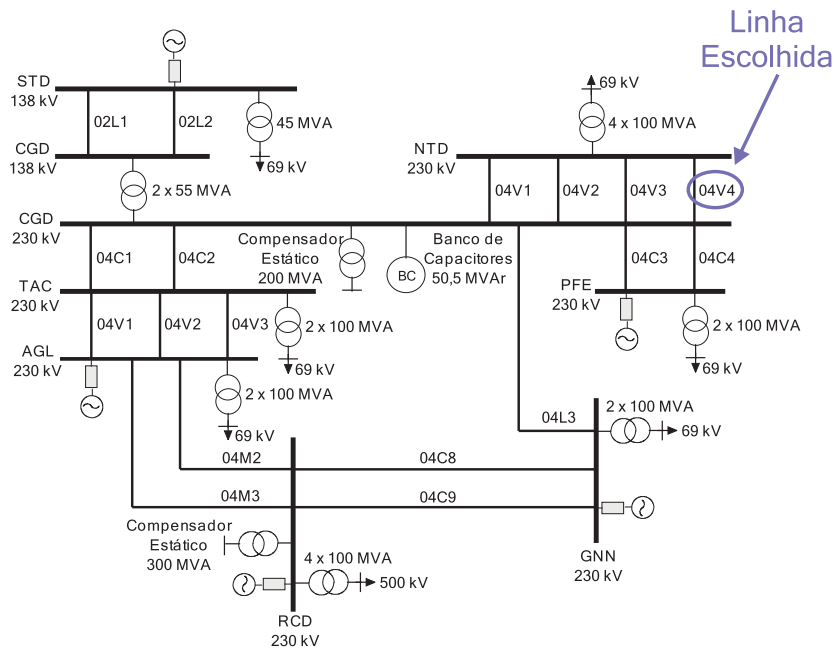


Figura 5.9. Diagrama unifilar simplificado do trecho do subsistema Leste de transmissão da CHESF.

Na Tabela 5.2 apresentam-se as variáveis de simulação utilizadas na obtenção dos três conjuntos de registros oscilográficos, totalizando 58 faltas.

Tabela 5.2. Variáveis utilizadas na simulação das faltas.

Variáveis de simulação	Registros oscilográficos com falta		
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3
Tipo de falta	AT	AT	AT
Resistência de falta	5-10-...-195-200	50	50
Ângulo de incidência	60	5-10-...-195-200	60
Locais de falta	90	90	5-10-...-175-180

5.1.5.3 Estimação dos Limiares de Energia E_1 e E_2

Na figura 5.10 apresentam-se os histogramas com os valores mínimos e máximos de energia, para os registros sem distúrbios avaliados (Tabela 5.1). A partir desses histogramas é possível estimar valores para os limiares de energia E_1 e E_2 .

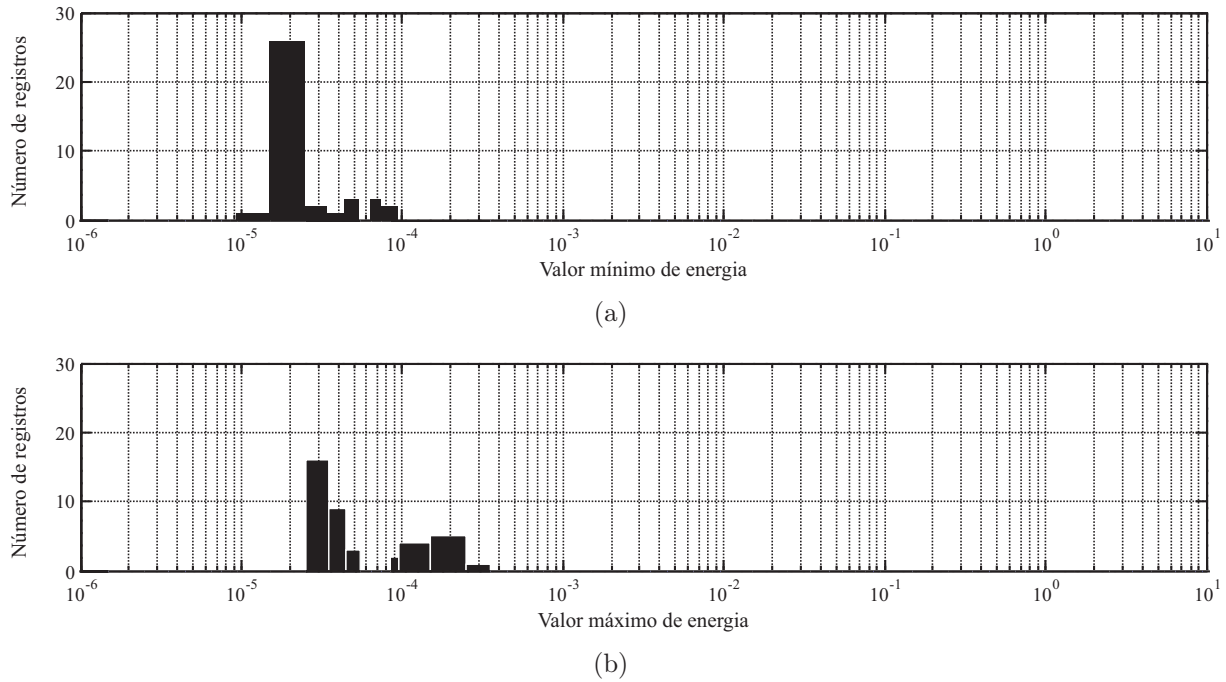


Figura 5.10. Histograma de energia para as correntes sem distúrbio: (a) energia mínima; (b) energia máxima.

Conforme os histogramas, o menor valor de energia dos coeficientes wavelet das correntes em registros sem distúrbio é 1.10^{-5} (Figura 5.10(a)), enquanto que o maior valor é 3.10^{-4} (Figura 5.10(b)). Portanto, $E_1 = 1.10^{-5}$ e $E_2 = 3.10^{-4}$.

5.1.5.4 Estimação da Variação Mínima de Energia ΔE_{min}

Na Figura 5.11 apresentam-se os histogramas com as variações máximas de energia (ΔE_{max}) dos transitórios de chaveamento, faltas e afundamentos de tensão (Tabela 5.1). Observa-se que ΔE_{max} corresponde ao início dos distúrbios e em transitórios de chaveamento, ΔE_{max} é da ordem de 1.10^{-3} a 1.10^{-1} ; em registros de falta, observa-se uma variação íngreme de energia em um instante que correspondente ao início da falta, sendo $\Delta E_{max} > 8.10^{-2}$; em registros com afundamento de tensão, a variação máxima de energia varia de 4.10^{-4} a 6.

Na Tabela 5.3 apresentam-se a faixa de variação máxima de energia obtida para cada distúrbio avaliado. Conclui-se que a variação de energia, em algum ponto da curva de energia, pode corresponder a uma falta se o seu valor for maior ou igual a $7,32.10^{-2}$. Estimou-se $\Delta E_{min} = 1.10^{-2}$.

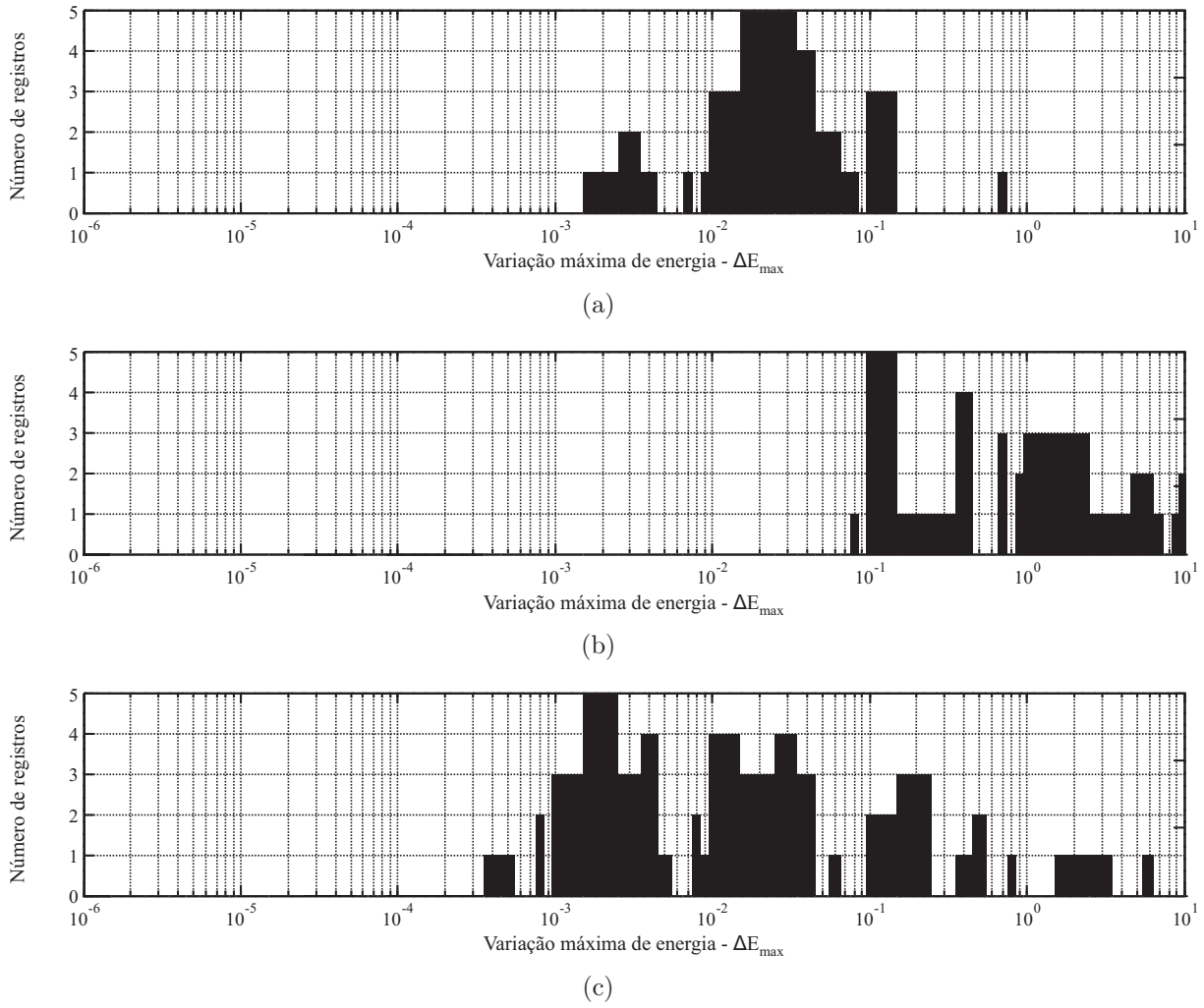


Figura 5.11. Histograma para a maior variação de energia dos registros com: (a) transitórios de chaveamento; (b) falta; (c) afundamento de tensão.

Tabela 5.3. Variação máxima de energia nos registros oscilográficos avaliados.

Registros oscilográficos	Quantidade de registros avaliados	ΔE_{max}	
		Menor valor	Maior valor
sem distúrbios	40	-	-
transitórios de chaveamento	33	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-1}$
falta	33	$8,14 \cdot 10^{-2}$	> 10
falta (simulados)	58	$7,32 \cdot 10^{-2}$	2,74
afundamento de tensão	50	$4,01 \cdot 10^{-4}$	5,79
energização	E_{LRa}	$2,94 \cdot 10^{-2}$	2,82
	E_{RLa}	0	0
	E_{RLf}	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$5,89 \cdot 10^{-3}$
	E_{LRf}	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$8,23 \cdot 10^{-2}$
desligamento	D_{RLf}	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$
	D_{LRf}	$9,75 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$
	D_{LRa}	$7,78 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$
	D_{RLa}	0	0

5.2 MÓDULO DE DELIMITAÇÃO DO INTERVALO DE FALTA

A análise pós-distúrbio das tensões e correntes é importante para se definir as causas, as conseqüências e as possíveis ações mitigadoras para melhoria contínua do desempenho operativo do sistema elétrico. No diagnóstico de faltas, destaca-se a etapa de delimitação correta do intervalo de falta, cujos instantes inicial e final podem ser usados na melhoria do desempenho de algoritmos de classificação de falta, visto que as principais características do fenômeno são obtidas durante esse período.

Na ocorrência e eliminação de uma falta, sucessivas reflexões de ondas viajantes na LT dão origem aos transitórios nas tensões e correntes (MURO *et al.*, 2003). Os níveis de sobretensões e sobrecorrentes dependem de vários fatores, como a natureza da falta e o comprimento da LT (D'AJUZ *et al.*, 1987). Como tais eventos podem danificar os equipamentos do sistema elétrico, a proteção deve atuar o mais rápido possível, no intuito de isolar a LT com falta do restante do sistema, preservando a sua estabilidade. Neste contexto, a identificação do instante final da falta é importante para se verificar e se ajustar o tempo de atuação do aparato de proteção.

Na Figura 5.12 são apresentadas as tensões e correntes referentes a uma falta CT⁷. De modo geral, um registro com falta é dividido em três intervalos, nos quais as tensões e correntes se comportam de modos distintos: intervalos de *pré-falta*, *falta* e *pós-falta* (SILVA, 2005).

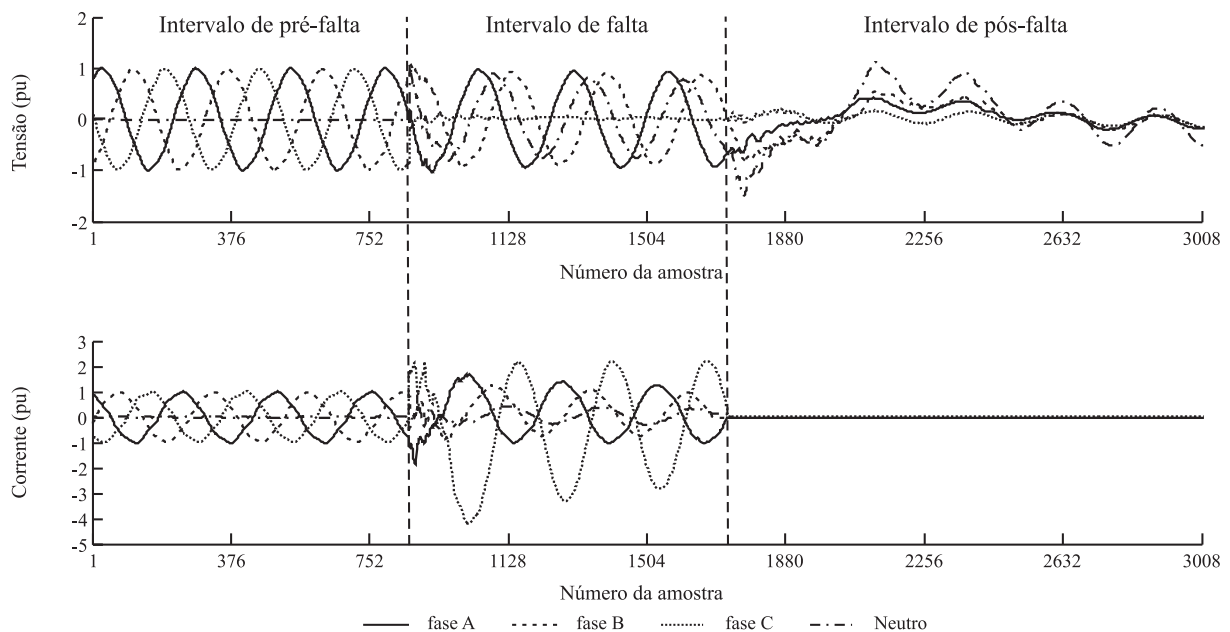


Figura 5.12. Registro real com a indicação das etapas de pré-falta, falta e pós-falta.

⁷Distúrbio ocorrido na LT 04V4_CGD-NTD, em 13 de janeiro de 2004, às 02 h, 28 min e 46 seg.

Em um registro com falta, as tensões e correntes em cada intervalo possuem características distintas, viabilizando a identificação dos instantes inicial e final da falta. Em suma, o intervalo de pré-falta é composto por amostras de tensões e correntes relacionados à operação do sistema em regime permanente. O intervalo de falta consiste nas amostras do registro referentes à operação do sistema em uma situação de falta. Por outro lado, o intervalo de pós-falta refere-se às amostras que indicam o comportamento do sistema, após a atuação do sistema de proteção.

5.2.1 Filtragem dos Coeficientes Wavelet

Registros oscilográficos, obtidos durante a ocorrência de uma falta, possuem sinais compostos por uma componente de frequência fundamental somada a transitórios oscilatórios, ruídos de natureza elétrica, algumas componentes harmônicas e componente DC.

Os coeficientes wavelet nas primeiras escalas são devidos às componentes de alta frequência do sinal (equação (3.16)). Portanto, os coeficientes wavelet nessas escalas são devidos aos transitórios (que geralmente possuem amplitude elevada) e aos ruídos.

Como a TWD é uma transformação linear, provavelmente, os coeficientes wavelet dos sinais em uma falta são resultados de uma combinação linear da TWD das ondas viajantes com a TWD dos ruídos. Sendo assim, é possível a separação dessas duas classes de coeficientes baseando-se no valor absoluto de suas amplitudes, através de técnicas de *filtragem* (CHEN *et al.*, 2003).

A filtragem dos coeficientes wavelet, em uma escala j , pode ser realizada ao eliminar os coeficientes cujas amplitudes sejam inferiores a um certo limiar λ_j . Essa técnica de filtragem é denominada de *hard wavelet threshold* (HWT) (SANTOSO *et al.*, 1997).

Para um determinado sinal de tensão ou corrente, o valor do limiar é concebido utilizando-se o máximo valor absoluto ($\max(\cdot)$) dos coeficientes wavelet d_j , na escala j , conforme a equação

$$\lambda_j = U \cdot \max(|d_j|), \quad (5.5)$$

sendo $0 \leq U < 1$ e indica o nível do limiar. Por exemplo, para $U = 0,15$ os coeficientes cujas amplitudes em valores absolutos sejam inferiores a 15 % da maior amplitude, também em valor absoluto, serão anulados conforme a seguinte equação:

$$\hat{d}_j(k) = \begin{cases} d_j(k), & \text{if } |d_j(k)| \geq \lambda_j, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.6)$$

sendo \hat{d}_j os coeficientes wavelet, na escala j , após o processo de filtragem.

Na Figura 5.13 apresenta-se uma corrente de falta⁸. Os coeficientes wavelet normalizados ($max(|d_j|) = 1$), na primeira escala, antes e após a etapa de filtragem dos coeficientes são apresentados na Figura 5.14. Após a filtragem, espera-se que os coeficientes wavelet não eliminados sejam relacionados aos transitórios oriundos da falta. Portanto, atribui-se o primeiro e o último coeficiente aos instantes inicial e final da falta, respectivamente. A precisão desses instantes está intimamente relacionado ao valor do limiar λ_j (Figuras 5.14(b) e 5.14(c)).

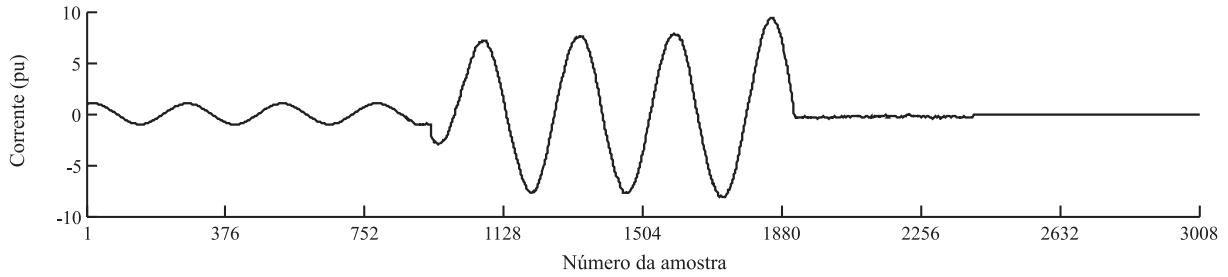


Figura 5.13. Sinal de corrente na fase B em uma falta monofásica do tipo BT.

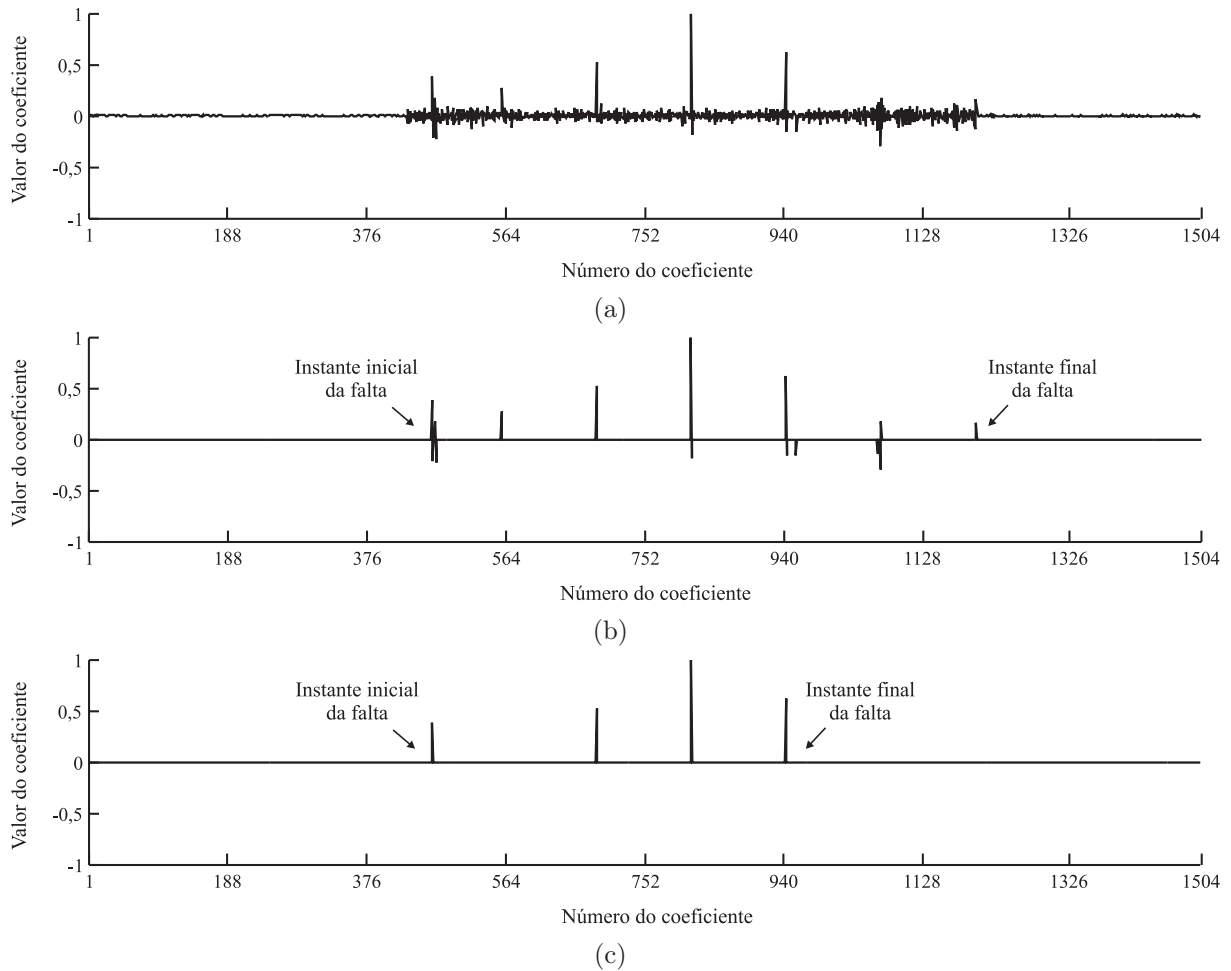


Figura 5.14. Coeficientes wavelet, na primeira escala: (a) antes da filtragem; (b) filtrado com $U = 0,15$; (c) filtrado com $U = 0,30$

⁸Distúrbio ocorrido na LT 05L8_AGD-RCD, em 12 de janeiro de 2005, às 02 h, 28 min e 46 seg.

5.2.2 Transitórios nas Tensões e Correntes

A ocorrência e eliminação de uma falta resultam em sobretensões transitórias, cujos valores são influenciados por diversos fatores, dentre os quais destacam-se: a natureza da falta, o comprimento da LT e o local da falta (D'AJUZ *et al.*, 1987). A partir dos coeficientes wavelet, na primeira escala, é possível localizar no tempo as componentes de alta frequência oriundas dos transitórios das tensões, desde que o espectro de frequência dessa escala contemple tais componentes.

Na Figura 5.15(a) apresentam-se os sinais de tensão referentes a uma falta do tipo AT simulada no ATP, na LT 04V4_CGD-NTD, cujos respectivos coeficientes wavelet são apresentados na Figura 5.15(b). De modo geral, os coeficientes com amplitudes mais relevantes concentram-se nas proximidades dos instantes inicial e final da falta.

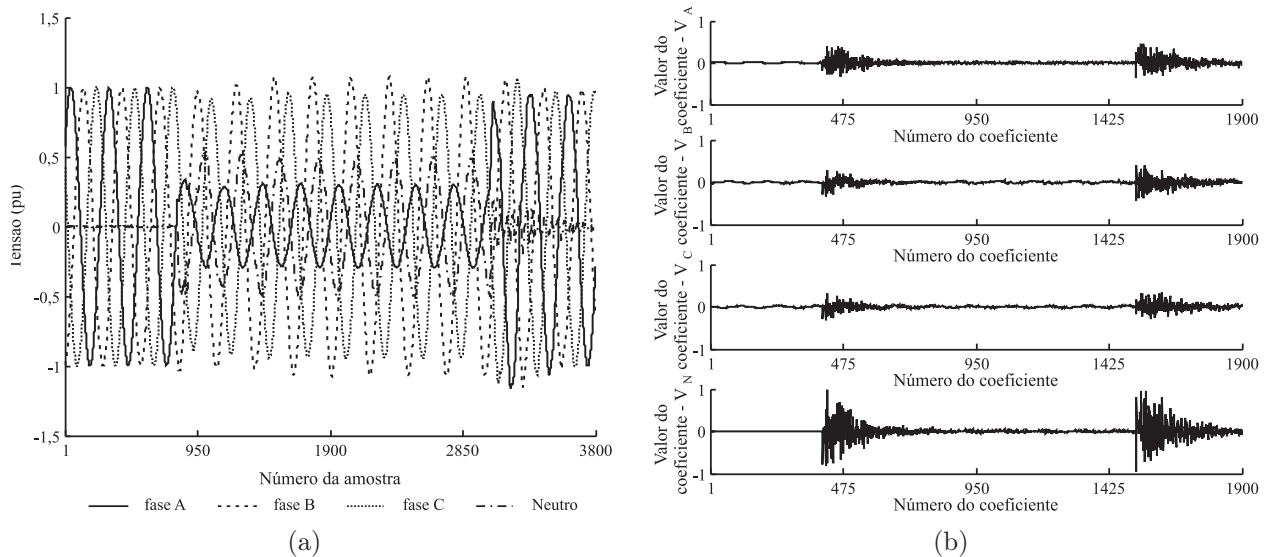


Figura 5.15. Falta monofásica na fase A: (a) tensões no domínio do tempo; (b) coeficientes wavelet.

Na prática, considerando o mesmo local de falta e uma mesma configuração do sistema, os transitórios nas tensões decorrentes de uma falta apresentam-se de formas distintas, uma vez que dependem de variáveis aleatórias, como por exemplo, a resistência de falta e o ângulo de incidência (D'AJUZ *et al.*, 1987).

Independente das condições que originaram a falta, o instante inicial é obtido com relativa facilidade através dos coeficientes wavelet das tensões, após a filtragem (Figura 5.16). Neste caso, supõe o sistema operando em regime permanente antes da ocorrência do distúrbio.

A identificação do instante final da falta através dos coeficientes wavelet das tensões não é uma tarefa fácil. Normalmente, os contatos dos disjuntores se abrem na passagem da corrente por zero, reduzindo assim, as chances de re-ignição dos contatos do disjuntor (GREENWOOD, 1991). No entanto, sobretensões transitórias são geradas nos contatos do disjuntor após a sua abertura (*tensão de restabelecimento transitória*) e conseqüentemente, na LT. Em alguns casos, a corrente é interrompida antes da sua passagem por zero, gerando transitórios muito severos nas tensões após a abertura do disjuntor (CHOWDHURI, 1996).

As sobretensões transitórias decorrentes da abertura do disjuntor, na eliminação de uma falta, são mais severas que as sobretensões transitórias no instante de ocorrência da falta (CLERICI; TASCHINI, 1970). Esse fato pode resultar em coeficientes wavelet com amplitudes mais elevadas referentes ao instante final da falta. Como os transitórios são amortecidos lentamente, a identificação do instante final da falta a partir da análise dos coeficientes wavelet das tensões torna-se mais difícil (Figura 5.16).

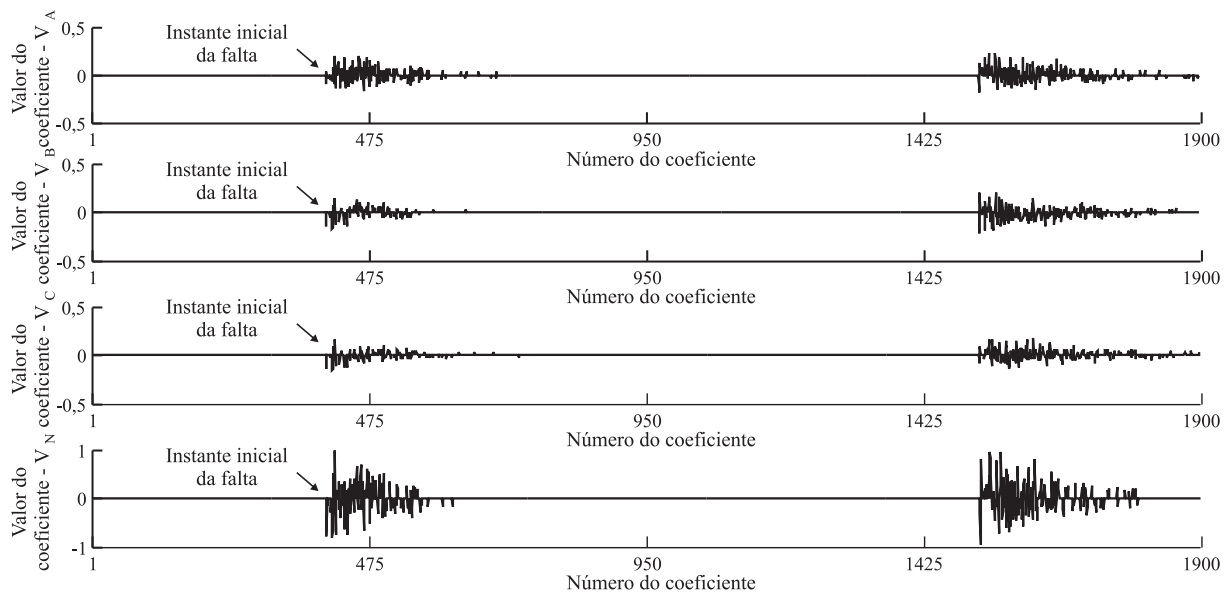


Figura 5.16. Coeficientes wavelet das tensões, na primeira escala, após a etapa de filtragem com $U = 0,15$

Na Figura 5.17(a) apresem-se as correntes simuladas referentes às tensões ilustradas na Figura 5.15(a). Na Figura 5.17(b) apresentam-se os coeficientes wavelet, na primeira escala, dessas correntes. As sobrecorrentes transitórias mais severas decorrentes de uma falta se concentram nos primeiros ciclos, sendo gradativamente amortecidas (ANDERSON, 1999). Portanto, os coeficientes com amplitudes mais relevantes se concentram normalmente, nas proximidades do instante inicial da falta.

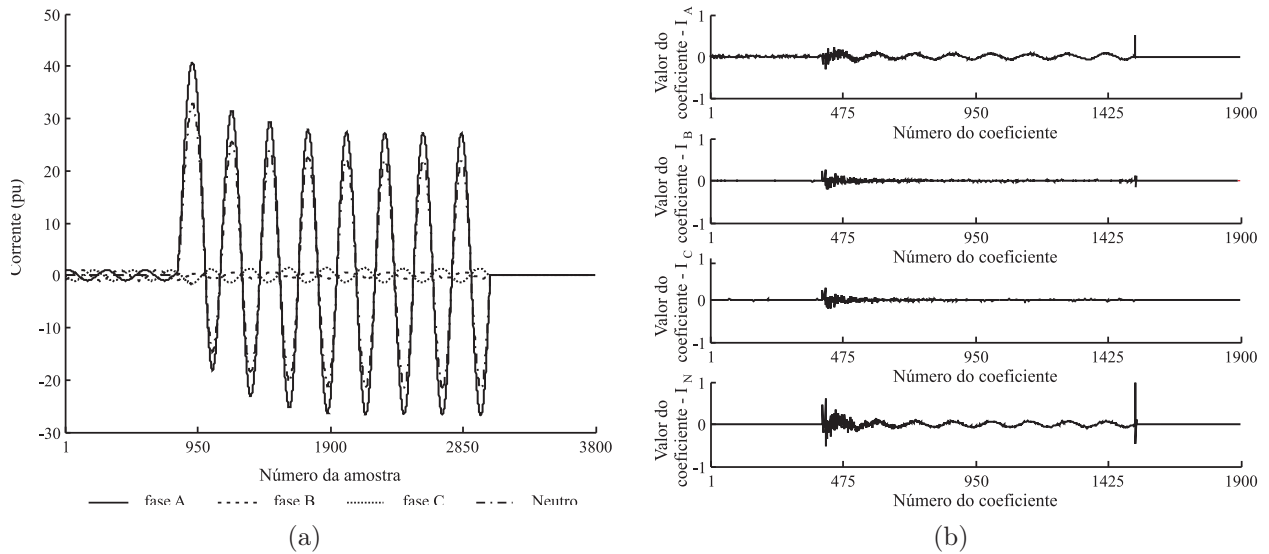


Figura 5.17. Falta monofásica na fase A: (a) correntes no domínio do tempo; (b) coeficientes wavelet.

Quando o sistema de proteção atua no sentido de extinguir a falta, as correntes são eliminadas na passagem por zero, não sofrendo variações bruscas em termos de amplitude. Neste caso, os coeficientes wavelet da primeira escala em torno do instante final da falta podem possuir baixa amplitude, podendo ser eliminados pela filtragem.

Na Figura 5.18 apresentam-se os coeficientes wavelet, após a filtragem, das correntes ilustradas na Figura 5.17(a). Neste exemplo, é possível identificar o início da falta a partir dos coeficientes wavelet de todas as correntes. Por outro lado, o instante final só é obtido através dos coeficientes wavelet das correntes da fase A e de neutro (correntes envolvidas com a falta).

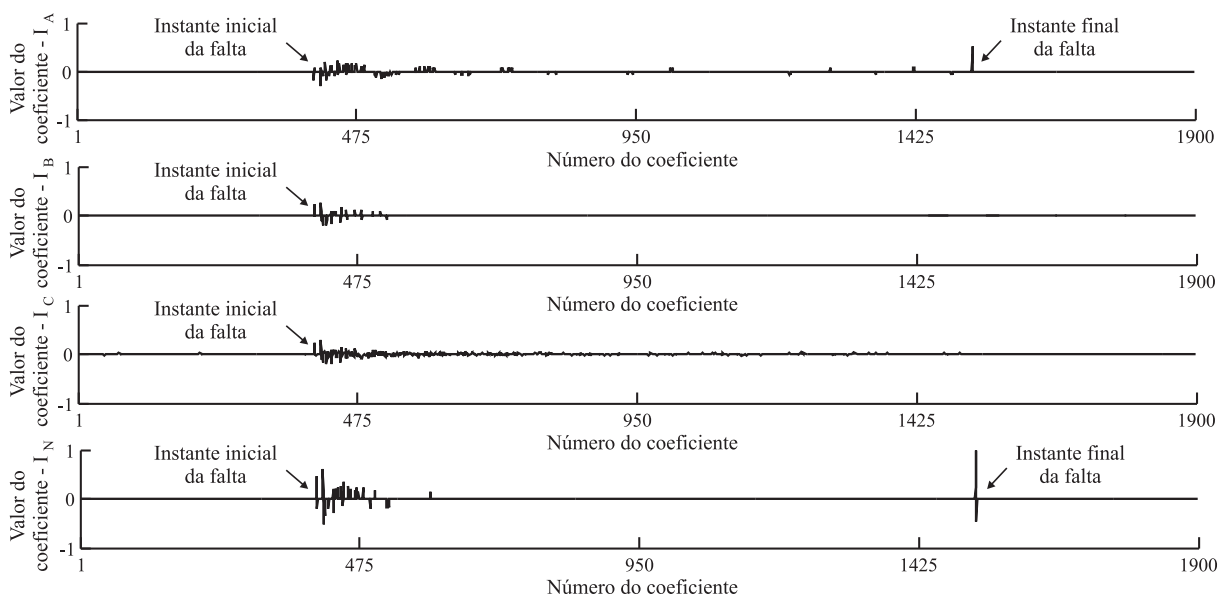


Figura 5.18. Coeficientes wavelet das correntes, na primeira escala, após a etapa de filtragem com $U = 0,15$

Da análise dos transitórios nos sinais de tensão e corrente durante a ocorrência de uma falta em uma LT, têm-se as seguintes conclusões:

1. No instante inicial do curto-circuito:
 - (a) Os transitórios mais severos são encontrados nas tensões e correntes de falta, sendo gradativamente amortecidos no tempo.
 - (b) As tensões e correntes são também afetadas pelos transitórios devido ao acoplamento magnético existente entre as fases de uma LT.
 - (c) Os transitórios dependem de vários parâmetros, como por exemplo: localização, resistência e ângulo de incidência da falta.
 - (d) De modo geral, o instante inicial da falta pode ser obtido mediante análise dos coeficientes wavelet das tensões e correntes.
2. Após a abertura tripolar do disjuntor, na tentativa de isolar e eliminar o curto-circuito:
 - (a) Sobretensões transitórias são originadas, dificultando a identificação do instante final pela análise dos coeficientes wavelet das tensões.
 - (b) Cada corrente é interrompida em sua passagem por zero e geralmente, o instante final da falta é identificado através da análise dos coeficientes wavelet das correntes de falta.

5.2.3 Escolha das Correntes

A utilização dos coeficientes wavelet das correntes de falta provavelmente, implica em melhor precisão na obtenção dos instantes inicial e final da falta, visto que os transitórios são mais severos. No entanto, a execução da etapa de delimitação do intervalo de falta é realizada antes da etapa de classificação, o que torna as correntes de falta desconhecidas.

Pelo menos uma das correntes de fase tem participação na falta. Observa-se que os coeficientes wavelet com os maiores valores absolutos são normalmente, relacionados às correntes de falta. Portanto, pressupõe-se que a corrente de fase com maior coeficiente wavelet, em valor absoluto, é uma corrente de falta.

Em faltas que envolvem a terra, a corrente de neutro, no domínio wavelet, pode indicar os instantes inicial e final da falta com boa precisão. Uma outra característica dessa corrente é que os valores máximos de seus coeficientes wavelet, em valor absoluto, são da mesma ordem de grandeza dos maiores coeficientes wavelet das correntes de fase de falta.

As regras desenvolvidas para selecionar as correntes, cujos coeficientes wavelet da escala j serão utilizados na obtenção dos instantes inicial e final da falta são apresentadas a seguir.

1. Normalize os coeficientes wavelet da escala j , das correntes de fase e de neutro, tomando como base o maior coeficiente wavelet, em valor absoluto, das correntes de fase.
2. Selecione a corrente de fase (i_f), cujo algum coeficiente wavelet seja ± 1 .
3. Selecione a corrente de neutro (i_n) se o seu máximo coeficiente wavelet, em valor absoluto, for maior que 0,8.

De acordo com o critério de seleção das correntes apresentados acima, os coeficientes wavelet das correntes na fase A e de neutro, apresentados na Figura 5.18, seriam as correntes selecionadas para se estimar os instantes inicial e final da falta.

5.2.4 Escolha da Escala Wavelet

A ocorrência de queimadas nas proximidades das LT é responsável por muitas faltas em diversos países, inclusive no Brasil. Em uma situação de queimadas, a temperatura dos condutores em uma LT aumenta devido a absorção de calor pelo meio ambiente e ao efeito Joule. Além do mais, a rigidez dielétrica do ar é drasticamente reduzida. Esses fatores combinados com os altos níveis de tensão propiciam o surgimento das faltas em LT (FONSECA *et al.*, 1990). Nessas condições, antes da formação do arco elétrico entre os condutores, é comum o surgimento de pré-descargas que resultam em oscilações de alta frequência nas correntes das fases afetadas. Na Figura 5.19 ilustra-se um registro oscilográfico referente a uma falta bifásica do tipo AB⁹, cujos sinais foram amostrados a 15,36 kHz. Na figura 5.19 destacam-se os transitórios decorrentes de pré-descargas ocorridos na corrente da fase A.

⁹Distúrbio ocorrido na LT 04F3_DMG-BNB, em 30 de agosto de 2003, às 09 h, 25 min e 25 seg, devido a uma queimada próximo a LT.

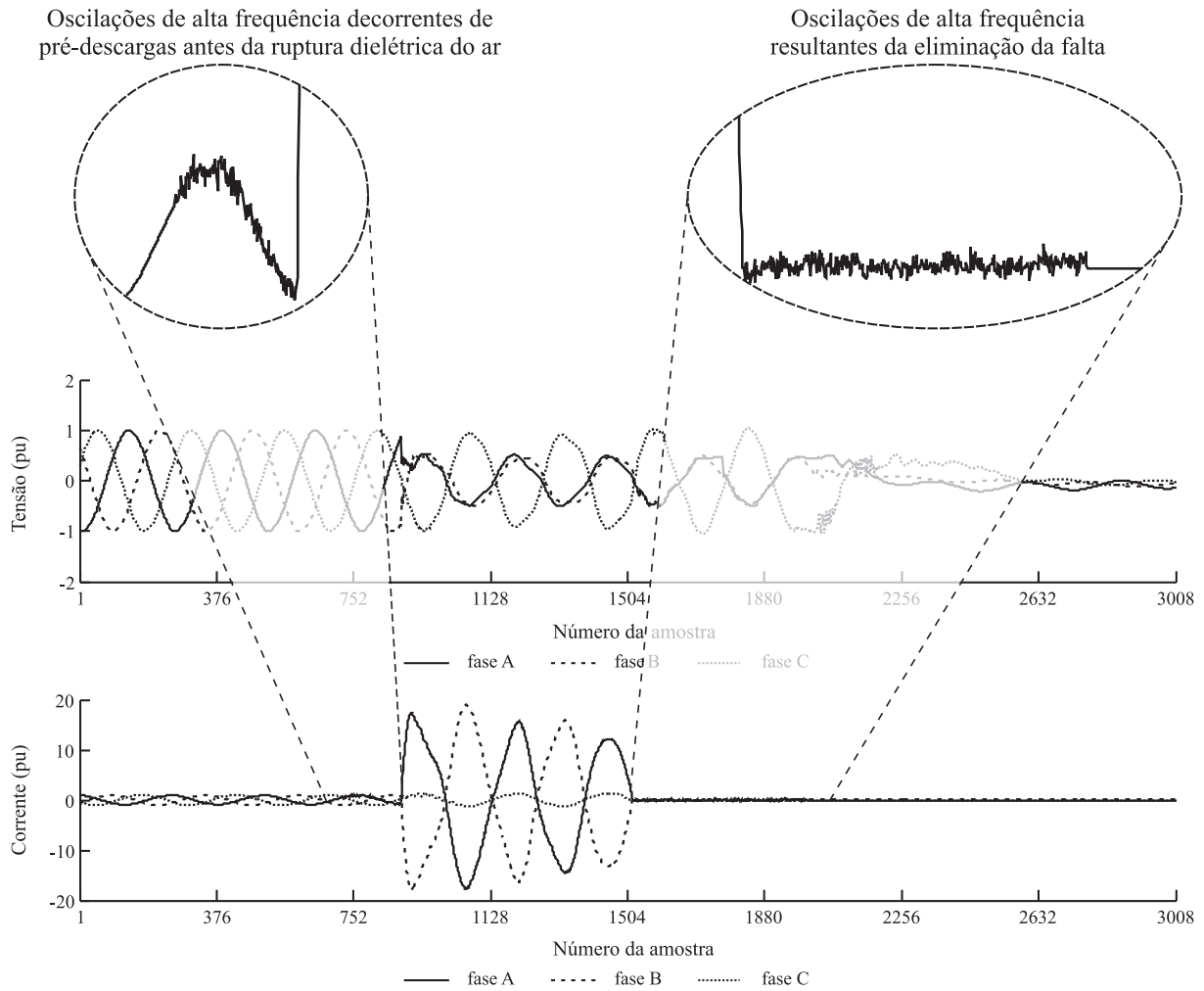


Figura 5.19. Oscilações de alta frequência nas correntes de falta antes e após a falta.

Quando os disjuntores atuam no sentido de extinguir o curto-circuito, é comum a ocorrência de oscilações de alta frequência nas correntes envolvidas com a falta, até que a completa extinção do arco elétrico seja realizada (Figura 5.19).

Os disjuntores normalmente, efetuam uma tentativa de religamento tripolar da LT após o período de tempo morto, o qual é da ordem de 0,5 a 1,5 s (IEEE STD C37.104-2002, 2003). Esse período é necessário para a completa extinção do arco elétrico quando a falta não é permanente.

Normalmente, um limiar com $U = 0,15$ (equação 5.5) é suficiente para eliminação dos coeficientes wavelet relacionados aos ruídos elétricos. No entanto, no exemplo apresentado na Figura 5.14(b), esse valor de limiar foi insuficiente para a correta identificação do instante final, devido às oscilações pós-falta.

Na Figura 5.20 apresenta-se a corrente na fase A, para o registro oscilográfico ilustrado na Figura 5.19. Os períodos de pré-falta e pós-falta são subdivididos em duas etapas, conforme as oscilações de alta frequência, antes e imediatamente após a abertura dos disjuntores, respectivamente.

Na Figura 5.21 apresentam-se os coeficientes wavelet da corrente (Figura 5.20), na primeira e na quinta escala. As oscilações de alta frequência decorrentes de pré-descargas antes da ruptura dielétrica do ar são normalmente, identificadas na primeira escala (Figura 5.21(a)), onde as componentes com maiores frequências são detectadas (equação (3.16)). Isso pode dificultar a identificação correta do instante inicial da falta. Entretanto, essas oscilações podem não serem detectadas em outras escalas, a depender da taxa de amostragem do sinal e do conteúdo espectral dos transitórios. Para o sinal apresentado na Figura 5.20, tais descargas não influenciaram os coeficientes wavelet da quinta escala (Figura 5.21(b)), sendo o instante inicial da falta identificado com boa precisão.

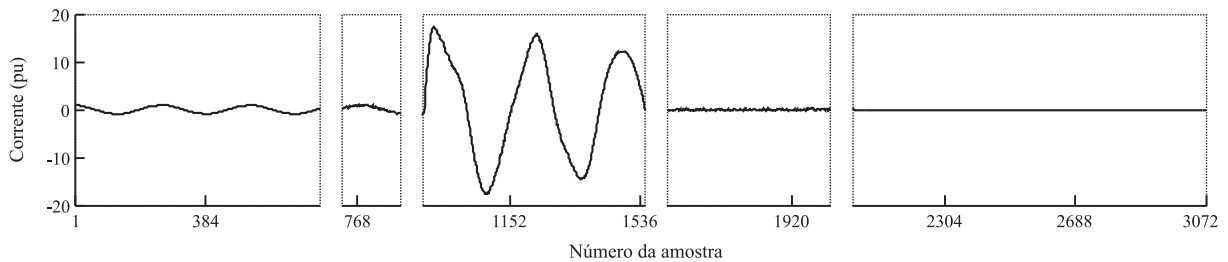


Figura 5.20. Corrente de falta com oscilações de alta frequência antes e após a falta.

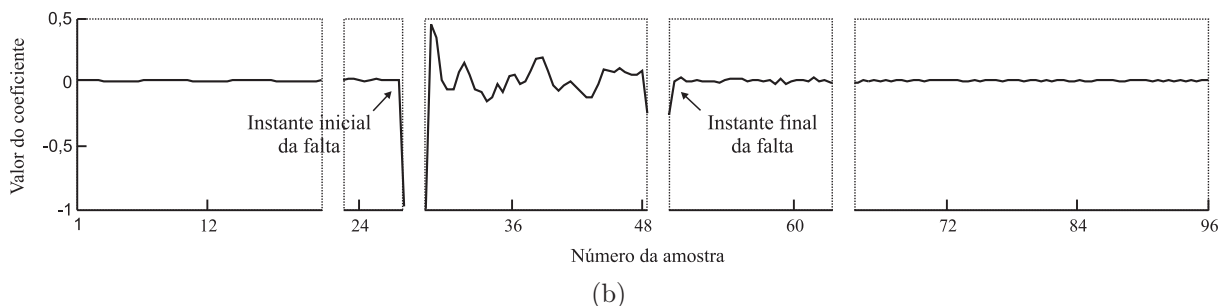
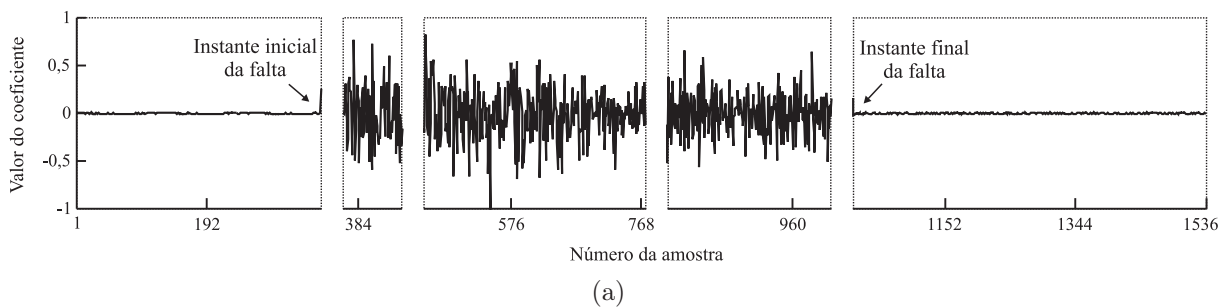


Figura 5.21. Influência das oscilações de alta frequência pré- e pós-falta: (a) escala 1; (b) escala 2.

Analogamente, as oscilações de alta frequência após a eliminação de um curto-circuito podem comprometer a identificação correta do instante final da falta, na primeira escala (Figura 5.21(a)). Portanto, a análise dos coeficientes wavelet das correntes em outras escalas é necessária. Para o sinal apresentado na Figura 5.20, o instante final da falta foi obtido com boa precisão na quinta escala (Figura 5.21(b)).

5.2.5 Escala Wavelet versus Frequência

Conforme equação (3.16), o espectro de frequência dos coeficientes wavelet de um sinal discreto $c_0(k)$, amostrado a uma frequência de amostragem f_s , varia de $f_s/2^{j+1}$ a $f_s/2^j$ em uma escala j . Portanto, para que uma frequência f_h pertença a esta banda, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\frac{f_s}{2^{j+1}} < f_h \leq \frac{f_s}{2^j}, \quad (5.7)$$

que resulta em:

$$\log_2 \left(\frac{f_s}{f_h} \right) - 1 < j \leq \log_2 \left(\frac{f_s}{f_h} \right). \quad (5.8)$$

Como a escala j associada à frequência f_h é um número natural, as desigualdades (5.8) são verdadeiras, conforme a definição apresentada a seguir.

Definição 1: considere $j \in \mathbb{N}$, $\alpha \in \mathbb{R} | 0 \leq \alpha < 1$ e $f_s \geq 2f_h$, então

$$\log_2 \left(\frac{f_s}{f_h} \right) = j + \alpha. \quad (5.9)$$

Considere o número total de amostras N_s do sinal original como sendo uma potência de dois. Desta forma, $j = 1, \dots, \log_2(N_s)$ e:

$$j \geq 1 \Rightarrow j + \alpha \geq 1 \Rightarrow \log_2 \left(\frac{f_s}{f_h} \right) \geq 1 \Rightarrow f_h \leq \frac{f_s}{2}. \quad (5.10)$$

Para que a frequência f_h seja igual a componente harmônica de ordem h é necessário $f_h = hf$, sendo f a frequência fundamental do sinal original.

Na Figura 5.22 são ilustradas as variáveis $j + \alpha$ e j em função da frequência f_h e da ordem da harmônica h , considerando $f_s = 1,2$ kHz, $f = 60$ Hz e $N_s = 2^6$. Conforme o gráfico apresentado, o espectro de frequência dos coeficientes wavelet da primeira escala ($j = 1$) contempla a componente harmônica de ordem 7, uma vez que:

$$\log_2 \left(\frac{1,2 \cdot 10^3}{7 \cdot 60} \right) = 1,51 = 1 + 0,51 \Rightarrow j = 1.$$

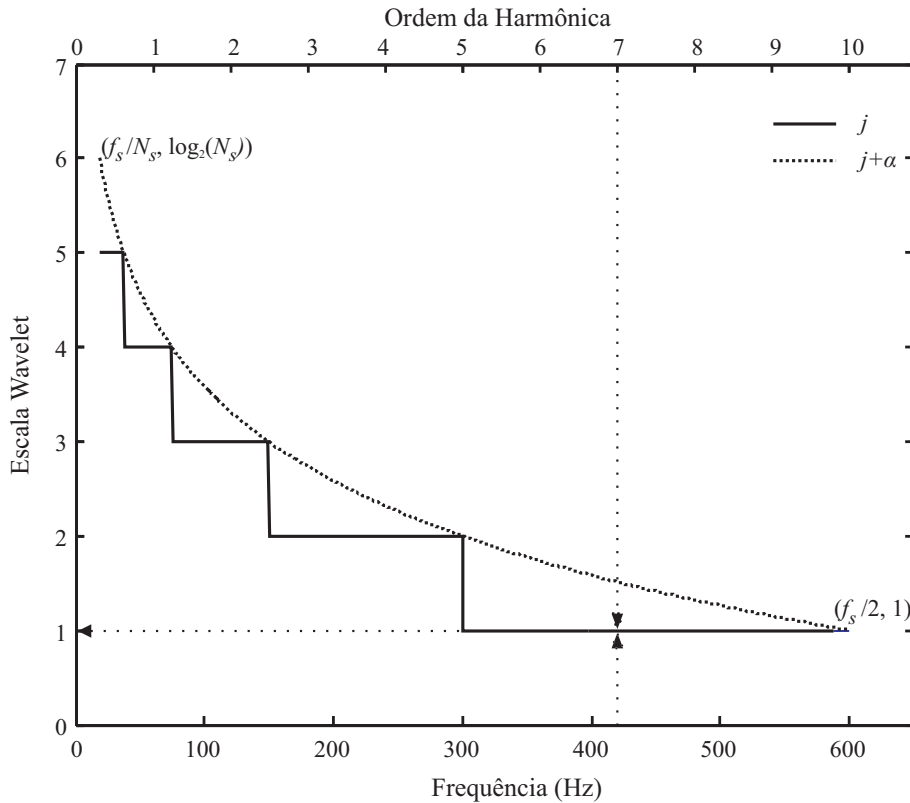


Figura 5.22. Escala wavelet versus frequência.

5.2.6 Sumário do Método Proposto

Após estudo minucioso do problema, propõe-se as seguintes regras de delimitação do intervalo de falta:

1. Escolha a escala j , conforme equação (5.9).
2. Aplique j estágios da TWD às correntes de fase e de neutro.
3. Escolha a corrente i_f e/ou i_n , de acordo com o algoritmo apresentado na seção 5.2.3.

4. Aplique a técnica de filtragem HWT às correntes selecionadas.
5. Identifique o índice do primeiro coeficiente wavelet diferente de zero (k_{i_1}), da corrente de fase selecionada.
6. Se i_n foi selecionada, identifique o índice do seu primeiro coeficiente wavelet diferente de zero (k_{i_2}).
7. Se i_n foi selecionada e $k_{i_2} > k_{i_1}$, faça $k_i = 2^j k_{i_2}$.
8. Senão, faça $k_i = 2^j k_{i_1}$.
9. Identifique o índice do último coeficiente wavelet diferente de zero (k_{f_1}), da corrente de fase selecionada.
10. Se i_n foi selecionada, identifique o índice do seu último coeficiente wavelet diferente de zero (k_{f_2}).
11. Se i_n foi selecionada e $k_{f_2} > k_{f_1}$, faça $k_f = 2^j k_{f_2}$.
12. Senão, faça $k_f = 2^j k_{f_1}$.
13. Os instantes inicial t_i e final t_f da falta são, respectivamente, $f_s \cdot k_i / f$ e $f_s \cdot k_f / f$.

5.2.7 Estimação das Variáveis de Delimitação do Intervalo de Faltas

Os registros oscilográficos reais com falta apresentados na Tabela 5.1 foram utilizados para avaliar o desempenho do método de delimitação do intervalo de falta, em diversas escalas. Os sinais de tensão e corrente dos registros foram amostrados com $f_s = 1,2$ ou $f_s = 15,36$ kHz.

Apresenta-se na Tabela 5.4, o desempenho do método proposto através do erro médio obtido para os instantes inicial e final da falta, em cada registro oscilográfico avaliado. Os melhores resultados foram obtidos na segunda escala, para os sinais com frequência de amostragem de 1,2 kHz; para frequência de amostragem de 15,36 kHz, a quinta escala apresentou melhor desempenho.

Tabela 5.4. Desempenho do método de delimitação do intervalo de falta em diversas escalas.

Escala	$f_s = 1,2$ kHz		$f_s = 15,36$ kHz	
	ϵ_i (ms)	ϵ_f (ms)	ϵ_i (ms)	ϵ_f (ms)
1	2,05	36,91	2,70	17,62
2	2,12	6,88	5,21	25,96
3	10,21	10,43	4,12	4,43
4	-	-	17,52	0,45
5	-	-	0,88	0,91
6	-	-	13,05	16,18

ϵ_i - Erro médio na identificação do instante inicial da falta.

ϵ_f - Erro médio na identificação do instante final da falta.

Na frequência de amostragem de 1,2 kHz, o espectro de frequência dos coeficientes wavelet da 2ª escala varia de 150 a 300 Hz, enquanto que em 15,36 kHz, o espectro de frequência da 5ª escala varia de 240 a 480 Hz. Sendo 60 Hz a frequência fundamental dos sinais, observa-se uma intersecção entre os espectros de frequência que contêm a 5ª harmônica (Tabela 5.5).

O método proposto utiliza a escala j , conforme equação (5.9), com $h = 5 \Rightarrow f_h = 5.f$.

Tabela 5.5. Espectro de frequência das escalas escolhidas conforme a frequência de amostragem.

f_s (kHz)	Escala	Espectro de frequência (Hz)	Ordem da harmônica
1,2	2	150-300	5, 6, 7, 8
15,36	5	240-480	3, 4, 5

Na etapa de filtragem dos coeficientes wavelet da escala j , observou-se os melhores resultados para $U = 0, 15$ (Equação (5.5)).

5.3 MÓDULO DE CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

O módulo de classificação de faltas é composto por um conjunto de regras que avalia a energia concentrada dos coeficientes wavelet, no intervalo de falta, das correntes de fase e de neutro.

Na Figura 5.23 apresentam-se as correntes de uma falta monofásica na fase A¹⁰, cujas curvas de energia janelada dos coeficientes wavelet dessas correntes, nas cinco primeiras escalas wavelet, são apresentadas na Figura 5.24.

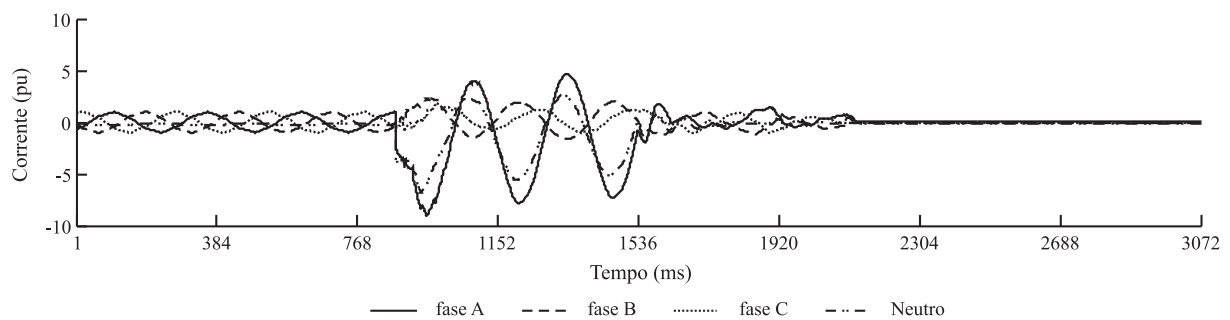


Figura 5.23. Correntes de uma falta monofásica na fase A.

As primeiras escalas wavelet são as mais apropriadas para a *detecção de transitórios de alta frequência* oriundos de faltas e manobras de chaveamento, de acordo com o espectro de frequência dos coeficientes wavelet nessas escalas. No entanto, devido ao acoplamento eletromagnético existente entre as fases da LT, transitórios eletromagnéticos durante a falta podem estar presentes nos sinais de tensão e corrente das fases sãs. Portanto, as primeiras escalas wavelet podem não ser apropriadas para a *classificação de faltas* (Figuras 5.24(a) e 5.24(b)).

Por outro lado, nas escalas wavelet com menor resolução, as wavelets tornam-se menos dilatadas no tempo e menos oscilatórias. Como resultado, componentes de baixa frequência podem ser detectadas, facilitando assim a sua classificação (Figura 5.24(e)).

Considerando que as análises dos registros oscilográficos não serão realizadas no modo online, o método proposto considera toda a duração da falta. Para isso, é preciso identificar a escala wavelet mais apropriada, conforme equação (5.9).

¹⁰Distúrbio ocorrido na LT 05C6_BEASJP, em 09 de julho de 2003, às 14 h, 02 min e 51 seg.

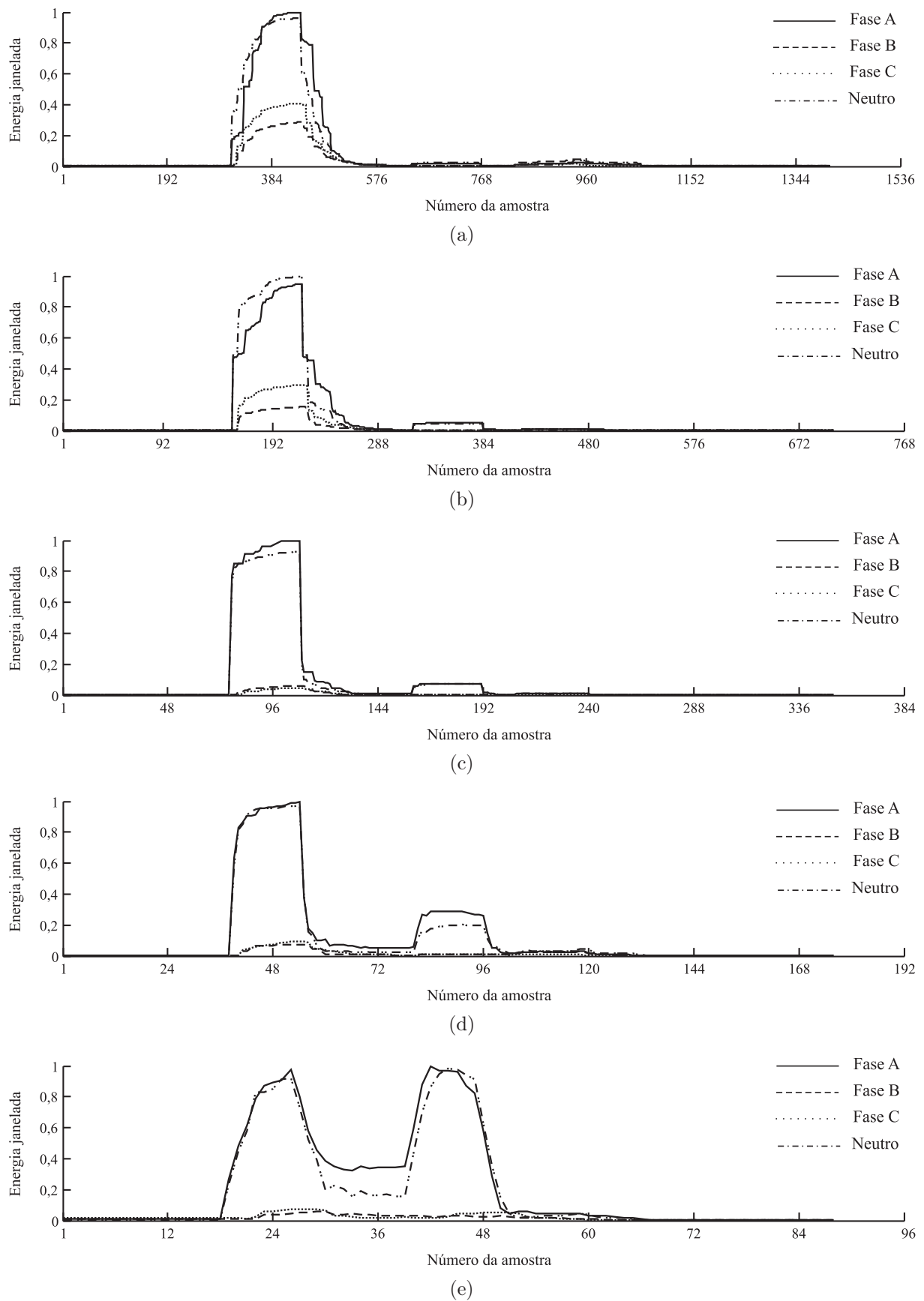


Figura 5.24. Energia janelada dos coeficientes wavelet das correntes de um registro oscilográfico com falta, na escala: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5.

5.3.1 Energia Concentrada no Intervalo de Falta

O algoritmo para classificação de faltas é baseado na energia concentrada dos coeficientes wavelet das correntes de fase e de neutro (E_A , E_B , E_C e E_N), durante o intervalo de falta, definidos em uma escala j :

$$E_A = \sum_{k=k_i/2^j}^{k_f/2^j} d_j^A(k), \quad (5.11)$$

sendo $d_j^A(k)$ o k -ésimo coeficiente wavelet da corrente na fase A. E_B , E_C e E_N são computados de forma análogas.

As energias concentradas são normalizadas pelo máximo valor entre E_A , E_B e E_C . Portanto, as energias variam de 0 (zero) a 1 (um).

5.3.2 Sumário do Método Proposto

Após a normalização, espera-se que a energia relacionada com uma corrente de falta seja próxima de um, caso contrário seja próxima de zero. Nesse sentido, a separação dessas duas classes de energias podem ser facilmente realizadas através de limiares, resultando na indicação do tipo de falta.

Os limiares de energia λ_{EF} e λ_{EN} são utilizados para distinguir as energias referentes as correntes sãs e de falta, respectivamente. As variáveis binárias A, B, C e N são utilizadas no auxílio da classificação de faltas, conforme Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Esquema de codificação utilizada para a classificação de faltas.

A	B	C	N	Tipo de falta	
1	0	0	1	Monofásica	AN
0	1	0	1		BN
0	0	1	1		CN
1	1	0	0	Bifásica	AB
1	0	1	0		AC
0	1	1	0		BC
1	1	0	1	Bifásica para terra	ABN
1	0	1	1		ACN
0	1	1	1		BCN
1	1	1	1	Trifásica	ABC

A seguir apresentam-se as regras de classificação de falta.

1. Escolha a escala j de acordo com a equação (5.9).
2. Aplique a TWD às correntes de fase e neutro.
3. Identifique os instantes inicial e final da falta.
4. Calcule E_A , E_B e E_C , conforme equação (5.11).
5. Normalize E_A , E_B e E_C pelo maior valor dentre eles.
6. Faça $A = B = C = 0$ e $N = 1$.
7. Se $E_A \geq \lambda_{EF}$, então faça $A = 1$.
8. Se $E_B \geq \lambda_{EF}$, então faça $B = 1$.
9. Se $E_C \geq \lambda_{EF}$, então faça $C = 1$.
10. Se $A + B + C = 2$ (falta bifásica ou bifásica para terra), então faça:
 - (a) Calcule a energia concentrada E_N , conforme a equação (5.11).
 - (b) Normalize E_N com o mesmo valor base usado no passo 5.
 - (c) Se $E_N < \lambda_{EN}$, então faça $N = 0$.
11. O tipo de falta é obtido pela combinação entre as variáveis A , B , C e N , de acordo com a Tabela 5.6.

Conforme o algoritmo acima, a participação da terra só é averiguada em faltas bifásicas, visto que a identificação de apenas uma fase ou das três fases implica necessariamente em uma falta monofásica ou trifásica, respectivamente.

5.3.3 Estimação das Variáveis de Classificação

5.3.3.1 Registros Oscilográficos Simulados

Escolheu-se a LT 04V4_CGD-NTD de 230 kV e 180 km, pertencente ao *subsistema leste* de transmissão da CHESF (Figura 5.9) para a simulação de faltas (BRITO *et al.*, 2004). Neste caso, as simulações tiveram como objetivo definir as variáveis utilizadas no algoritmo de classificação.

Na Tabela 5.7 apresentam-se as variáveis de simulação utilizadas, totalizando 1620 faltas, amostradas a 15,36 kHz.

Tabela 5.7. Variáveis de simulação usadas na simulação digital.

Variáveis de simulação	Valores
Tipo de falta	AN, BN, CN, AB, AC, BC, ABN, ACN, BCN, ABC
Localização da falta (km)	10, 20, 30, . . . , 160, 170, 180
Resistência de falta (Ω)	1, 10 and 100
Ângulo de incidência ($^\circ$)	30, 80 and 150

5.3.3.2 Escala Wavelet Analisada e Estimação dos Limiares de Energia λ_{EF} e λ_{EN}

Avaliou-se a energia concentrada dos coeficientes wavelet das correntes em diversas escalas, para identificar a melhor escala para classificação e os valores apropriados dos limiares de energia. Na Figura 5.25(a) apresenta-se a taxa de acerto na seleção das correntes de fase envolvidas na falta, assim como os melhores valores de λ_{EP} . De forma similar, o limiar λ_{EN} é avaliado na Figura 5.25(b).

De acordo com a Figura 5.25(a), o algoritmo apresentou 100 % de acerto para $0,43 \leq \lambda_{EP} \leq 0,50$ na 5^a escala. Por outro lado, essa taxa de acerto não foi obtida nas outras escalas avaliadas. O limiar λ_{EN} foi avaliado apenas para as faltas bifásicas e bifásicas para a terra, sendo $\lambda_{EN} = 0,02$ o melhor valor obtido para os registros simulados (Figura 5.25(b)).

Na Tabela 5.8 apresenta-se a melhor taxa de acerto na classificação de falta, em cada escala analisada.

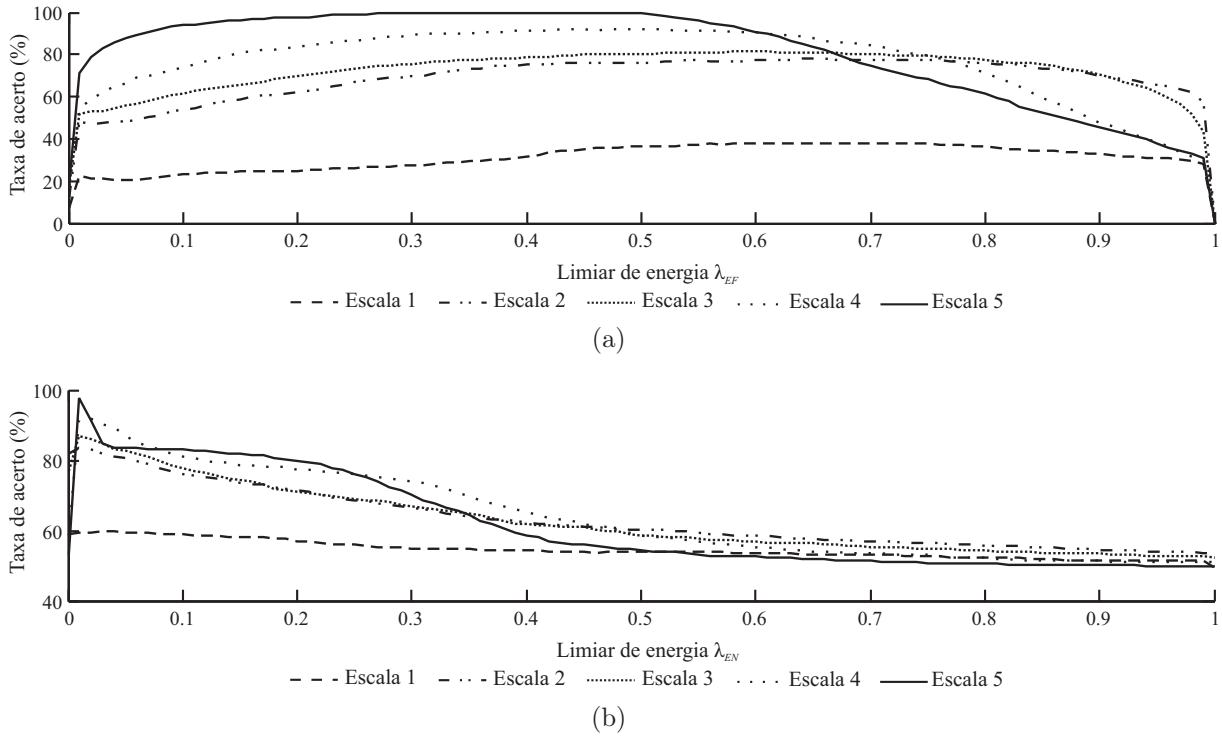


Figura 5.25. Taxa de acerto percentual versus: (a) λ_{EF} ; (b) λ_{EN} .

Tabela 5.8. Limiares de energia λ_{EP} e λ_{EN} que promovem a melhor taxa de acerto.

Escala	λ_{EF}	λ_{EN}	Taxa de acerto (%)
1	0,73	0,02	79,57
2	0,76	0,02	81,30
3	0,57	0,02	82,65
4	0,54	0,02	93,27
5	0,50	0,02	99,57

Tomando como base os resultados obtidos com os registros simulados (Tabela 5.7) e os registros reais (Tabela 5.1), definiu-se a escala j através da equação (5.9) com $h = 5$. Apesar de $\lambda_{EN} = 0,02$ ter sido o melhor valor para os registros simulados, escolheu-se $\lambda_{EN} = 0,1$ e $\lambda_{EF} = 0,5$.

AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Reporta-se neste capítulo os principais resultados decorrentes da avaliação do desempenho do método proposto ao considerar duas classes de registros oscilográficos reais obtidos do sistema de transmissão da CHESF:

- Registros oscilográficos reais padrões, com os distúrbios previamente descritos.
- Registros oscilográficos reais com erros de aquisição de dados.

A construção do método proposto foi feita considerando-se registros oscilográficos reais padrões (Tabela 5.1). No entanto, ao manipular registros reais, observam-se erros provenientes do sistema de aquisição de dados (Figura 6.1). Desta forma, a etapa de validação do método foi feita considerando-se ambos os tipos de registros.

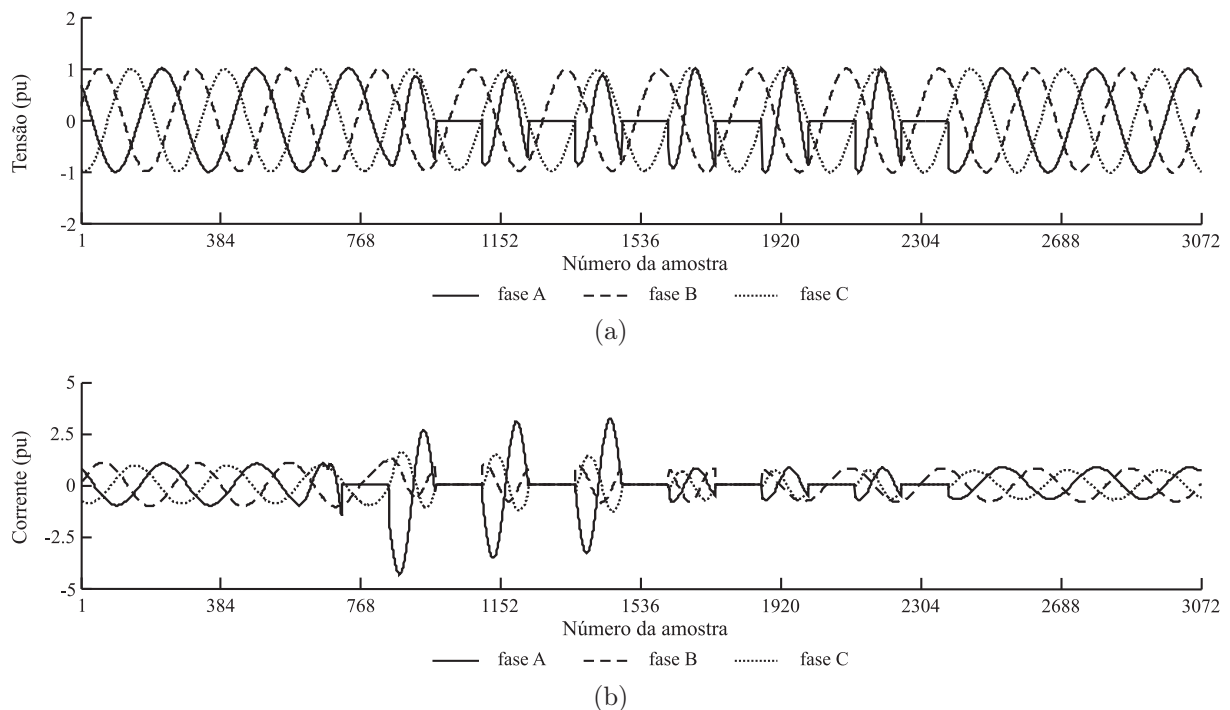


Figura 6.1. Registro oscilográfico com erros na aquisição de dados: (a) tensões; (b) correntes.

6.1 REGISTROS OSCILOGRÁFICOS REAIS PADRÕES

Na Tabela 6.1 apresentam-se os resultados obtidos na etapa de detecção de faltas, considerando-se 865 registros oscilográficos reais, obtendo-se 100 % de acerto.

Um total de 73 registros oscilográficos com faltas foram analisados, dos quais 10 registros são compostos por uma energização de LT seguido por falta. Conforme o objetivo do método proposto, apenas a falta deve ser detectada e avaliada.

Tabela 6.1. Resultados da detecção de faltas em registros oscilográficos reais.

Diagnóstico		Número de Registros Avaliados	Diagnósticos Corretos
Real	Esperado		
Sem defeito perceptível	Sem defeito perceptível	233	233
Transitórios de chaveamento	Sem defeito perceptível	102	102
Falta	Falta	63	63
Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível	284	284
Energização de LT	Sem defeito perceptível	106	106
Energização de LT + Falta	Falta	10	10
Desligamento de LT	Sem defeito perceptível	67	67
		865	865

Na Tabela 6.2 apresentam-se os resultados obtidos na etapa de classificação de faltas. Um total de 73 registros oscilográficos reais com falta, amostrados a 1,2 ou 15,36 kHz e com nível de tensão de 138, 230 ou 500 kV foram avaliados, obtendo-se 100 % de acerto.

Tabela 6.2. Resultados da classificação de faltas em registros oscilográficos reais.

Tipo de falta	Número de registros avaliados	Diagnósticos corretos
AT	14	14
BT	28	28
CT	20	20
AB	2	2
AC	1	1
BC	2	2
ABT	1	1
ACT	3	3
BCT	1	1
ABC	1	1
73		73

Cada registro oscilográfico com falta foi examinado manualmente para identificação dos instantes inicial e final. Em seguida, esses instantes foram comparados com os respectivos instantes inicial e final obtidos pelo método proposto. Na Tabela 6.3 apresenta-se uma amostra dos resultados obtidos na etapa de delimitação do intervalo de faltas.

Tabela 6.3. Resultados da delimitação do intervalo de faltas em registros oscilográficos reais.

Tipo de falta	Nível de tensão (kV)	Valores reais (ms)		Valores obtidos (ms)	
		t'_i	t'_f	t_i	t_f
AT	230	801,9	851,9	801,3	851,3
AT	138	140,0	206,2	138,7	205,4
BT	230	509,0	592,0	508,8	592,1
BT	138	428,8	486,7	428,7	487,0
CT	230	775,4	831,9	774,6	830,9
CT	230	713,3	760,6	712,6	760,6
CT	500	718,7	781,6	718,6	781,1
AB	230	1076,2	1117,0	1075,7	1117,4
BC	230	877,5	952,8	876,7	951,7
ACT	230	1082,7	1196,6	1085,7	1195,6
BCT	230	612,2	663,0	610,7	662,8
ABC	138	1080,4	2634,1	1081,3	2634,6

t'_i - Instante inicial da falta obtido manualmente.

t'_f - Instante final da falta obtido manualmente.

t_i - Instante inicial da falta obtido pelo método proposto.

t_f - Instante final da falta obtido pelo método proposto.

De um total de 73 faltas analisadas, obteve-se um erro médio de aproximadamente 2 ms, sendo o erro relativo aos instantes inicial e final dado por $|t'_i - t_i|$ e $|t'_f - t_f|$, respectivamente.

6.2 REGISTROS OSCILOGRÁFICOS REAIS COM ERROS NA AQUISIÇÃO DOS DADOS

Na prática, são freqüentes registros oscilográficos com erros na aquisição dos dados, como por exemplo, aquisição descontínua dos dados de corrente e/ou tensão (Figura 6.1), o que provoca mudanças instantâneas nos valores das correntes e/ou tensões.

A aquisição descontínua das correntes pode caracterizar sucessivos desligamentos ou faltas, seguido por sucessivas energizações. Felizmente, observa-se que as correntes se anulam por períodos de aproximadamente um ciclo da freqüência fundamental, período equivalente ao tamanho da janela utilizada no cálculo das energias, evitando assim que os valores de energia se anulem.

Na Figura 6.2 apresenta-se a corrente na fase A para o registro oscilográfico com afundamento de tensão ilustrado na Figura 6.1. A energia janelada dos coeficientes wavelet, na primeira escala, para essa corrente é apresentada na Figura 6.3. Observa-se que as principais características, na curva de energia, utilizadas na etapa de detecção não são violadas. No entanto, o término do distúrbio é *mascarado* pelo término do erro de aquisição.

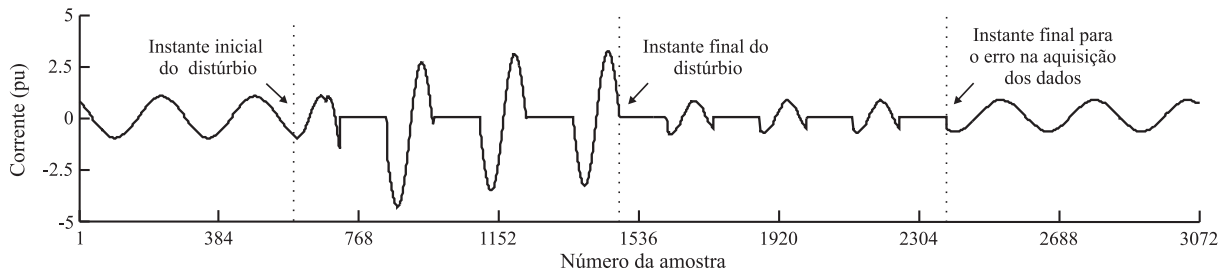


Figura 6.2. Corrente na fase A de um registro com erros na aquisição de dados.

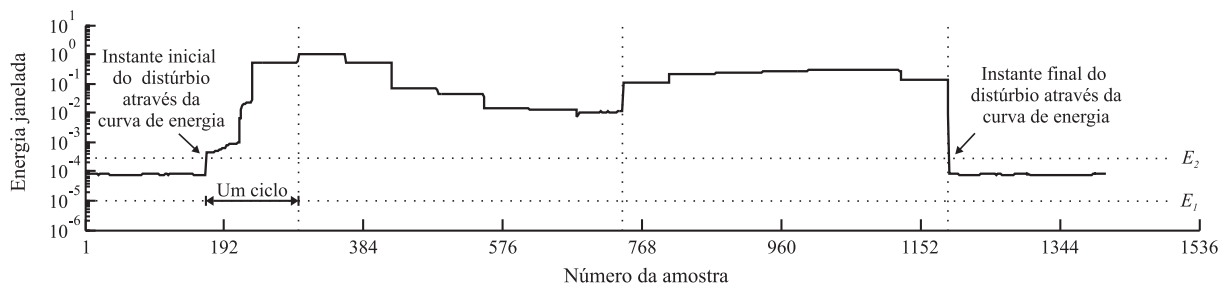


Figura 6.3. Energia janelada dos coeficientes wavelet, na primeira escala, para a corrente na fase A.

Na Figura 6.4 apresenta-se um outro tipo de registro oscilográfico com erros na aquisição dos dados dos sinais de corrente. Observam-se distorções nas formas de onda das correntes durante os períodos em regime permanente. Esse fato pode disparar a rotina de detecção de falta várias vezes, em virtude de possíveis variações bruscas de energia, em diversos instantes.

Diante destes problemas, a rotina de detecção de falta é normalmente avaliada várias vezes. No entanto, a detecção da falta ocorre corretamente, visto que as correntes se anulam após a abertura dos disjuntores, na eliminação da falta.

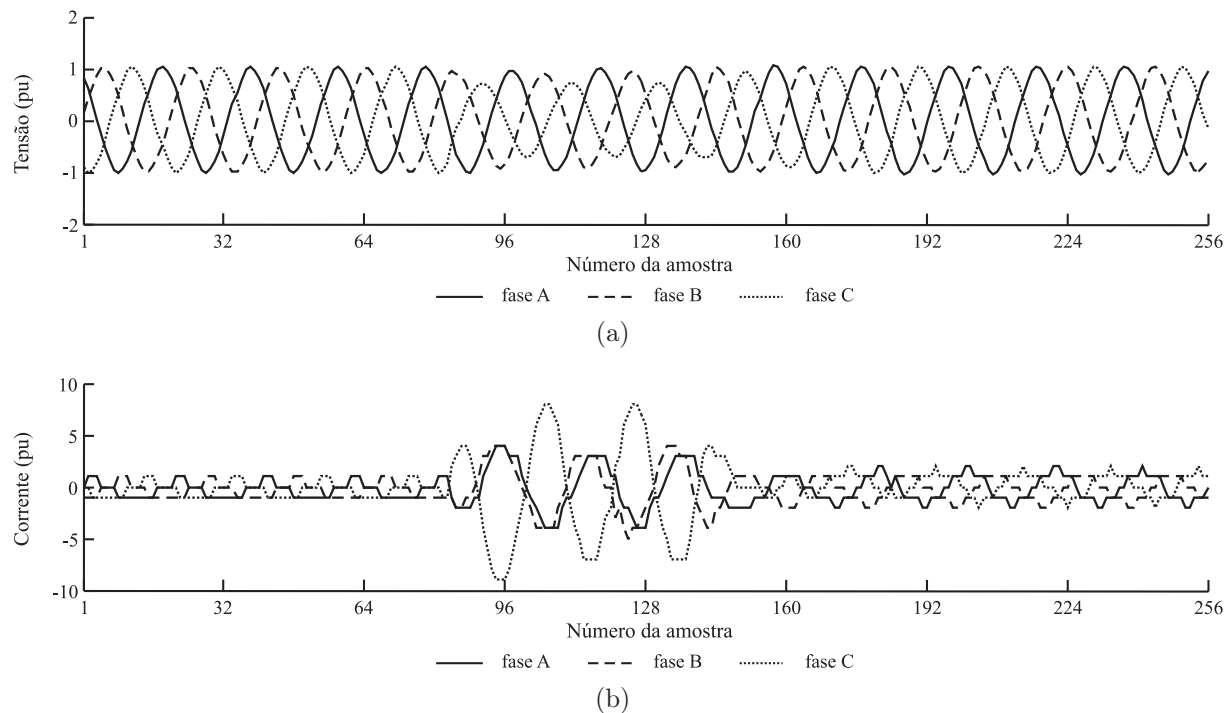


Figura 6.4. Registro oscilográfico com erros na aquisição dos dados: (a) tensões; (b) correntes.

Na Tabela 6.4 apresentam-se os resultados obtidos na etapa de detecção de faltas, considerando-se 215 registros oscilográficos reais. Um total de 100 % de acerto foi obtido nessa etapa.

Tabela 6.4. Resultados da detecção de faltas em registros reais com erros na aquisição dos dados.

Diagnóstico		Número de Registros Avaliados	Diagnósticos Corretos
Real	Esperado		
Sem defeito perceptível	Sem defeito perceptível	173	173
Falta	Falta	2	2
Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível	24	24
Energização de LT	Sem defeito perceptível	7	7
Desligamento de LT	Sem defeito perceptível	9	9
		215	215

Para os dois registros oscilográficos com falta, obteve-se um erro de aproximadamente 2 ms na identificação dos instantes inicial e final. Os dois casos estão relacionados à faltas monofásicas da fase A para a terra. A rotina de classificação de faltas também agiu corretamente nestes casos.

6.3 ESTUDO DE CASO

Avalia-se a aplicabilidade do método proposto mediante um estudo de caso, no qual apresenta-se a análise de registros oscilográficos capturados em diversas LT, devido a ocorrências de faltas na LT 05L9 de 500 kV e 170 km, em 28 de janeiro de 2005. Essa linha interliga as subestações Angelim II (AGD) e NTD do subsistema Leste da Chesf (Figura 6.5).

Na Figura 6.6 apresentam-se as tensões e correntes referentes a um registro oscilográfico de uma falta do tipo CT¹ que ocorreu a 87 km da subestação de AGD, devido à queimadas de plantações de cana-de-açúcar.

A falta na LT 05L9 ocasionou afundamentos de tensão nas linhas circunvizinhas, capturados pelos RDP conectados aos terminais das LT afetadas. Desta forma, além de analisar os registros oscilográficos coletados na LT 05L9, analisaram-se também, os registros obtidos nas LT 05L8, 05L5 e 05L7 (Figura 6.5).

Na Figura 6.7 apresentam-se as tensões e correntes² capturadas pelo RDP que monitora a LT 05L8, paralela à LT 05L9, instalado na subestação AGD. Durante a ocorrência da falta na LT 05L9, observa-se um afundamento da tensão na LT 05L8. Com a saída da LT 05L9 (Figura 6.6), o sistema passa para um novo estado de operação, no qual o fluxo de potência entre as subestações AGD e RCD é estabelecido pela LT 05L8 (Figura 6.5), provocando assim, um aumento em sua corrente. Comportamento análogo é visto nas outras LT.

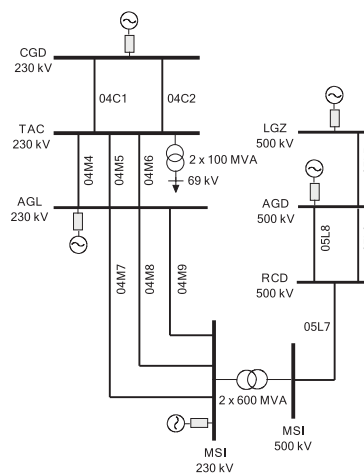


Figura 6.5. Diagrama unifilar simplificado do trecho do subsistema leste de transmissão da CHESF, ao qual pertence a LT 05L9.

¹Distúrbio ocorrido na LT 05L9_AGD-RCD, em 28 de janeiro de 2005, às 15 h, 05 min e 40 seg.

²Distúrbio ocorrido na LT 05L8_AGD-RCD, em 28 de janeiro de 2005, às 15 h, 05 min e 40 seg.

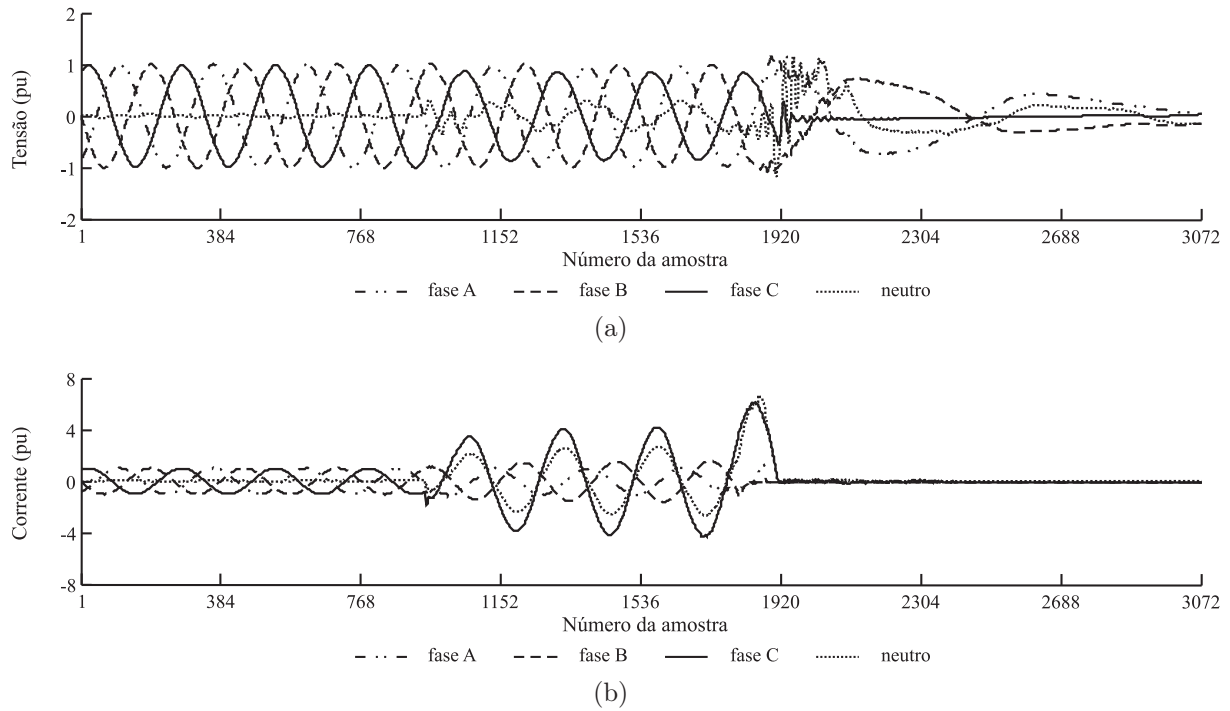


Figura 6.6. Registro oscilográfico com falta coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.

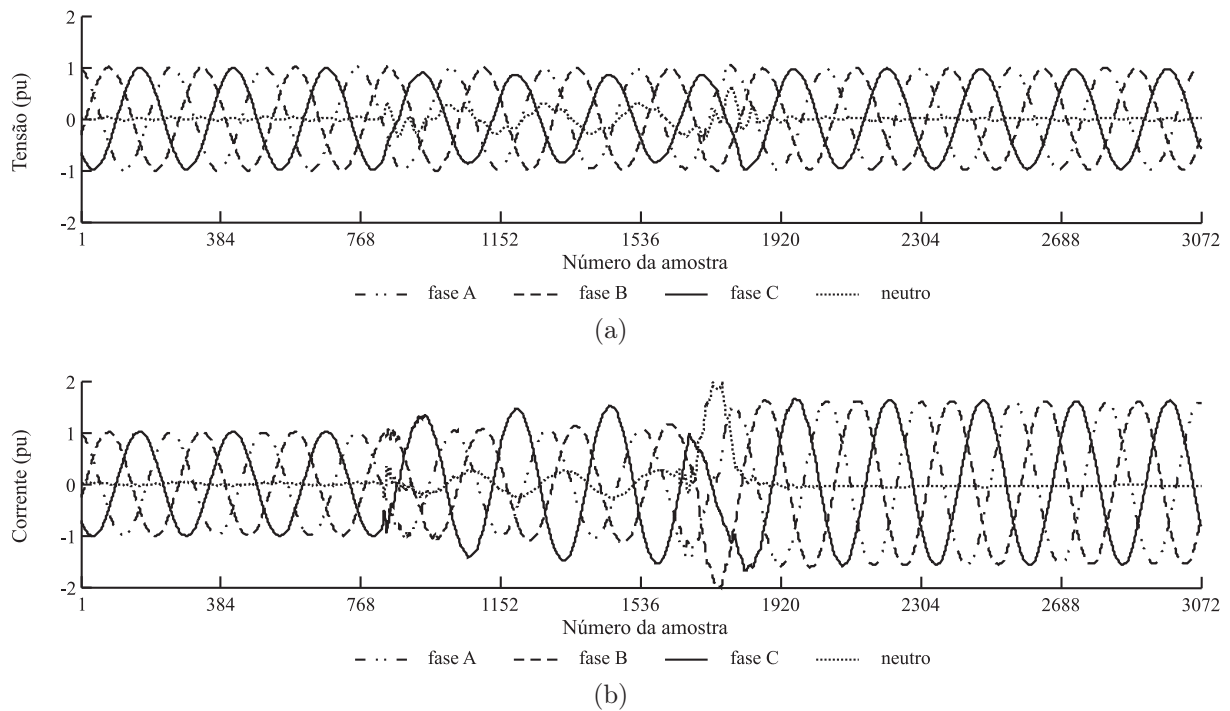


Figura 6.7. Registro com afundamento de tensão coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.

Na Tabela 6.5 apresenta-se um sumário da análise de diversos registros oscilográficos capturados por RDP instalados nas LT 05L9, 05L8, 05L5 e 05L7, no dia 28 de janeiro de 2005.

Tabela 6.5. Registros obtidos nas LT 05L9, 05L8, 05L5 e 05L7 em 28 de janeiro de 2005.

Horário da Ocorrência	LT Avaliada	Diagnóstico do Registro Capturado	
		Real	Obtido
15:05:40	05L9_AGD-RCD	Falta CT	Falta CT
	05L9_RCD-AGD	Falta CT	Falta CT
	05L8_AGD-RCD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L8_RCD-AGD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L7_MSI-RCD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L7_RCD-MSI	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L5_LGZ-AGD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
15:05:41	05L9_AGD-RCD	Energização E_{LRa}	Sem defeito perceptível
	05L9_RCD-AGD	-	-
	05L8_AGD-RCD	-	-
	05L8_RCD-AGD	-	-
	05L7_MSI-RCD	-	-
	05L7_RCD-MSI	-	-
	05L5_LGZ-AGD	-	-
15:05:42	05L9_AGD-RCD	Energização E_{RLf}	Sem defeito perceptível
	05L9_RCD-AGD	-	-
	05L8_AGD-RCD	Variação de Carga	Sem defeito perceptível
	05L8_RCD-AGD	-	-
	05L7_MSI-RCD	-	-
	05L7_RCD-MSI	-	-
	05L5_LGZ-AGD	-	-
15:05:51	05L9_AGD-RCD	Falta CT	Falta CT
	05L9_RCD-AGD	Falta CT	Falta CT
	05L8_AGD-RCD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L8_RCD-AGD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L7_MSI-RCD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L7_RCD-MSI	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
	05L5_LGZ-AGD	Afundamento de tensão	Sem defeito perceptível
15:10:53	05L9_AGD-RCD	Energização E_{LRa}	Sem defeito perceptível
	05L9_RCD-AGD	Energização E_{RLa}	Sem defeito perceptível
	05L8_AGD-RCD	-	-
	05L8_RCD-AGD	-	-
	05L7_MSI-RCD	-	-
	05L7_RCD-MSI	-	-
	05L5_LGZ-AGD	-	-
15:11:16	05L9_AGD-RCD	Energização E_{RLf}	Sem defeito perceptível
	05L9_RCD-AGD	-	-
	05L8_AGD-RCD	Variação de Carga	Sem defeito perceptível
	05L8_RCD-AGD	-	-
	05L7_MSI-RCD	-	-
	05L7_RCD-MSI	-	-
	05L5_LGZ-AGD	-	-

Conforme Tabela 6.5, às 13 h, 5 min e 40 s ocorreu uma falta CT (Figura 6.6) na LT 05L9 e afundamentos de tensão nas LT circunvizinhas. O aparato do sistema de proteção isolou a LT em curto-circuito e o fluxo de potência foi redistribuído entre as LT sem defeito.

Devido a natureza não permanente da falta, em aproximadamente um segundo, o terminal da LT 05L9 na subestação de AGD foi religado. Neste instante, nenhuma ocorrência foi registrada nos RDP avaliados, com exceção do RDP conectado ao terminal energizado. O outro terminal da LT 05L9, na subestação de RCD, foi religado em aproximadamente dois segundos, após a eliminação da falta e o fluxo de potência foi redistribuído entre as LT.

A segunda manobra de religamento da LT 05L9 foi registrada pelo RDP da presente linha e pelo RDP da LT 05L8, ambos na subestação AGD (Tabela 6.5). Nessa manobra de religamento, na qual o fluxo de potência na LT 05L9 foi restabelecido, os sinais de corrente das outras LT apresentaram um comportamento de variação de carga que poderia levar ao disparo dos RDP. Na Figura 6.8 apresentam-se as tensões e correntes do registro oscilográfico³ capturado pelo RDP da LT 05L9, enquanto que na Figura 6.9 apresentam-se as tensões e correntes do registro oscilográfico⁴ capturado pelo RDP da LT 05L8, ambos no terminal de AGD devido a essa manobra.

Após a primeira ocorrência da falta na LT 05L9, o sistema de proteção atuou corretamente ao isolar a LT, religando-a posteriormente, em aproximadamente 2 segundos. No entanto, a queimada que ocasionou a falta não foi imediatamente contida e após 9 segundos, uma ruptura dielétrica no ar entre os condutores, deu origem a uma outra falta do tipo CT, na mesma LT. Conforme Tabela 6.5, afundamentos de tensão nas outras LT foram registrados.

Percebe-se que o sistema de proteção, na segunda ocorrência da falta, atuou corretamente extinguindo a falta ao abrir os disjuntores nos dois terminais da LT. Entretanto, a LT só foi energizada depois de 5 minutos.

Às 15 h, 52 min e 53 segundos, registrou-se uma terceira falta na LT 05L9. O aparato do sistema de proteção da LT atuou corretamente, religando-a em 2 segundos. Às 15 h, 52 min e 57 segundos, registrou-se outra falta nessa linha, a qual só foi religada após 5 minutos.

³Distúrbio ocorrido na LT 05L9_AGD-RCD, em 28 de janeiro de 2005, às 15 h, 05 min e 42 seg.

⁴Distúrbio ocorrido na LT 05L8_AGD-RCD, em 28 de janeiro de 2005, às 15 h, 05 min e 42 seg.

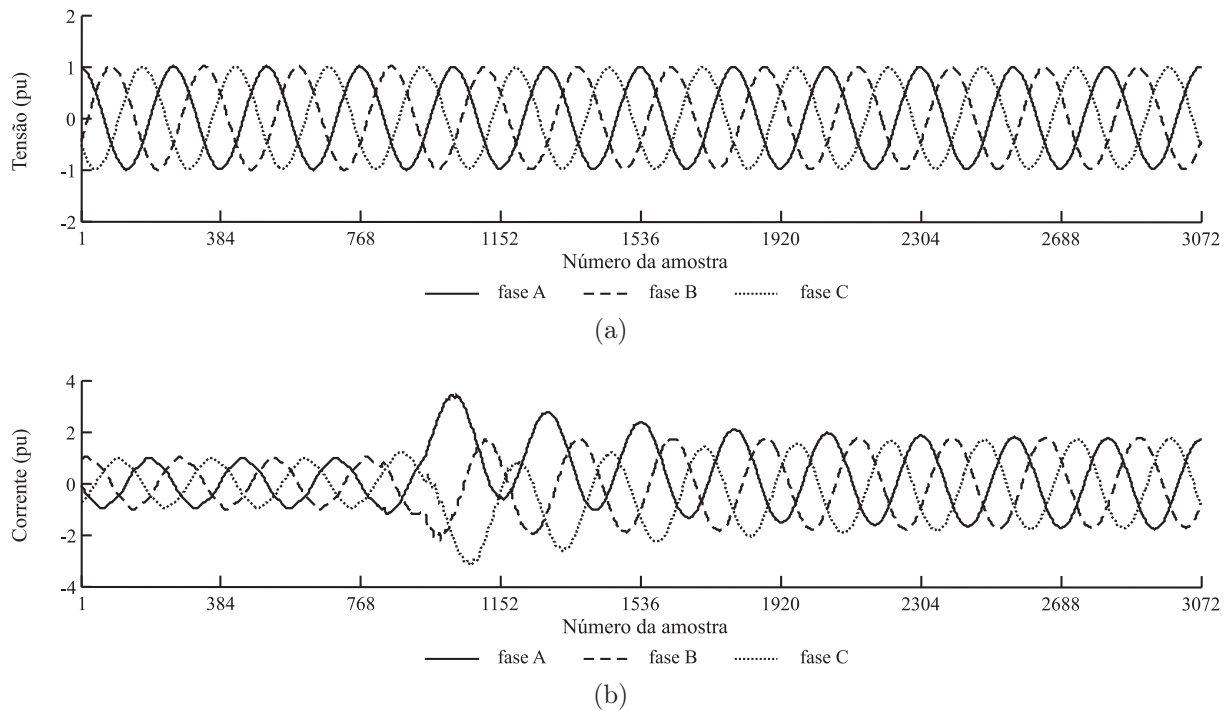


Figura 6.8. Registro com energização coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.

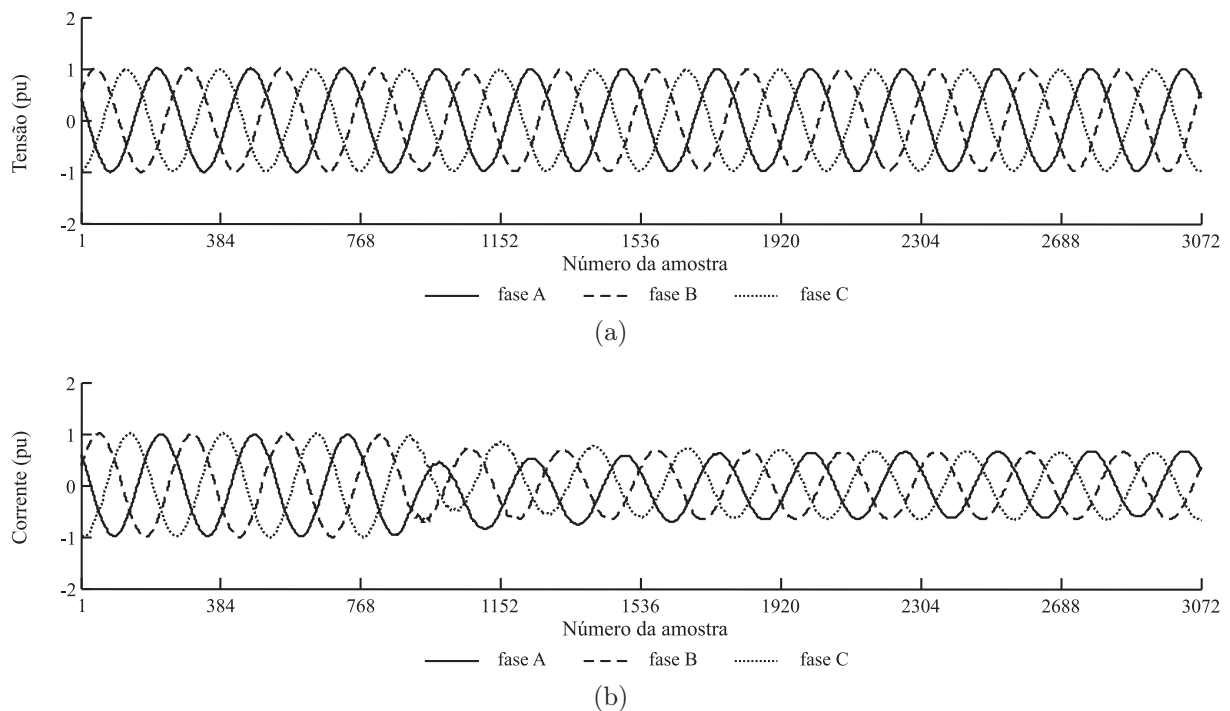


Figura 6.9. Registro com variação de carga coletado no terminal AGD: (a) tensões; (b) correntes.

As quatro faltas que resultaram em um total de 8 registros de falta foram detectadas e classificadas corretamente, com exceção da terceira falta⁵ coletada pelo RDP no terminal da subestação de RCD, por se tratar de um registro atípico (Figura 6.10).

⁵Distúrbio ocorrido na LT 05L9_RCD-AGD, em 28 de janeiro de 2005, às 15 h, 52 min e 53 seg.

Observa-se na Figura 6.10 que apenas o instante final da falta e o período pós-falta foram registrados. Como as regras de detecção foram elaboradas avaliando-se uma variação brusca de energia no início do distúrbio, este fato comprometeu o desempenho da rotina de detecção de faltas.

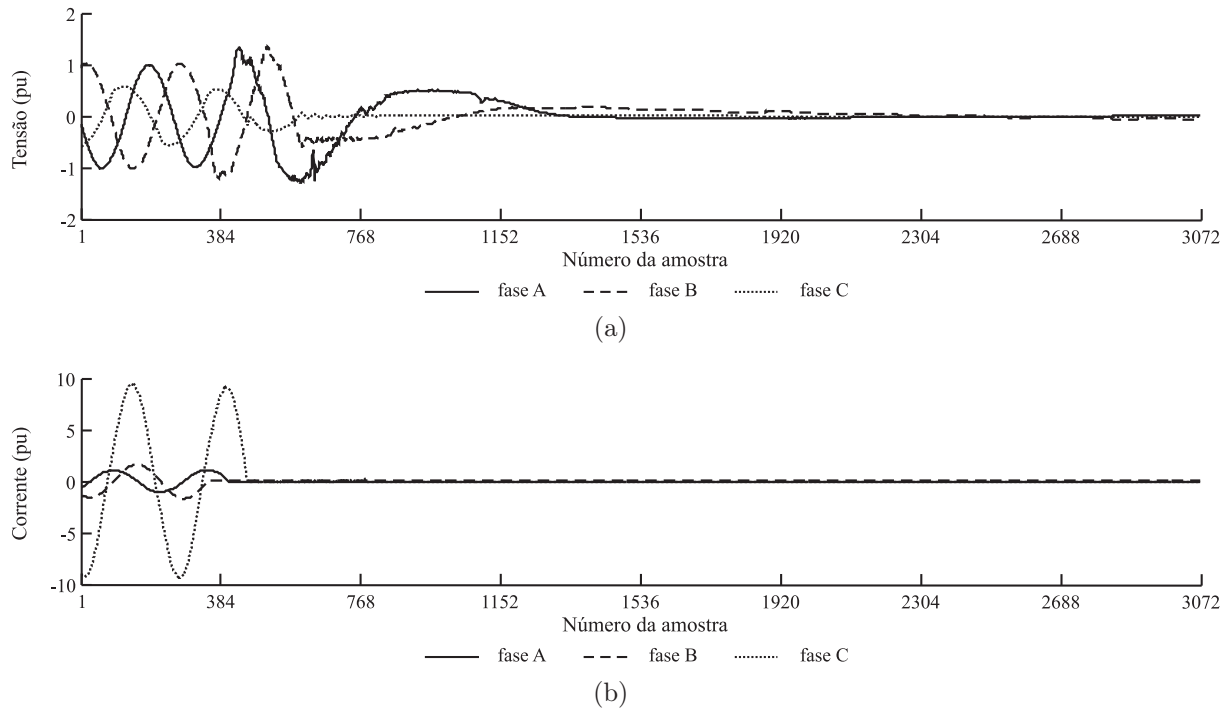


Figura 6.10. Registro oscilográfico atípico com falta: (a) tensões; (b) correntes.

CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou um novo método de diagnóstico de faltas em LT, baseado na transformada wavelet. O seu desempenho foi avaliado utilizando-se registros oscilográficos reais obtidos de várias LT do sistema CHESF.

De um modo geral, o algoritmo de detecção de falta foi sempre bem sucedido. Além da situação normal de operação em regime permanente do sistema, as faltas foram diferenciadas dos distúrbios associados à QEE, operações de manobra para manutenção do sistema e eventos com erros na aquisição dos dados. Obteve-se uma taxa de acerto de 100 % na etapa de detecção de faltas, considerando-se 1080 registros oscilográficos reais.

O algoritmo para determinação da duração da falta também foi bem sucedido, apresentando um erro médio de 2 ms para os 75 registros oscilográficos reais com falta avaliados.

O algoritmo para classificação de falta apresentou 100 % de acerto para os registros oscilográficos reais com falta avaliados. Para os casos simulados, algumas faltas bifásicas para a terra foram classificadas como faltas bifásicas. Tais casos são considerados atípicos, visto que a impedância de falta era elevada e a falta ocorreu muito distante do ponto de monitoramento.

Novas regras devem ser incorporadas ao método, visando torná-lo mais robusto. Desta forma, são propostos como trabalhos futuros:

1. Diagnosticar os registros oscilográficos que não tenham sido associados com faltas, a exemplos dos registros com distúrbios de QEE e com transitórios devido às operações de manutenção do sistema elétrico.
2. Diagnosticar os registros oscilográficos com múltiplos distúrbios, a exemplo de uma falta seguido por um religamento da LT em um único registro.
3. Melhorar as regras de identificação da duração e classificação de faltas, de forma a também analisar faltas evolutivas, indicando a duração e classificação de cada tipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, NJ - USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte/MG: Editora UFMG, 2005.
- ASSEF, Y.; CHAARI, O.; MEUNIER, M. Classification of power distribution system fault currents using wavelets associated to artificial neural networks. *International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, p. 421–424, 1996.
- BORRÁS, D.; CASTILLA, M.; MORENO, N.; MONTAÑO, J. C. Wavelet and neural structure: A new tool for diagnostic of power system disturbances. *IEEE Transaction on Industry Applications*, v. 37, n. 1, p. 184–190, Jan/Feb 2001.
- BRITO, N. S. D.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A.; DANTAS, K. M. C.; FONTES, A. V.; COSTA, F. B.; FERNADES, A. B.; SILVA, S. S. B. Influência do modelo de linhas de transmissão no diagnóstico de faltas. *Transmission and Distribution Latin America Conference*, São Paulo, Ago 2004.
- BURRUS, C. S.; RAMESH, A. G.; GUO, H. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.
- CHEN, W.; MALIK, O. P.; YIN, X.; CHEN, D.; ZHANG, Z. Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 4, p. 1134–1139, Oct. 2003.
- CHOWDHURI, P. *Electromagnetic Transients in Power Systems*. Great Britain: [s.n.], 1996.

- CLERICI, A.; TASCHINI, A. Overvoltage due to line energization and reenergization versus overvoltages caused by faults and fault clearing in ehv systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 89, n. 5/6, p. 932–941, May/June 1970.
- D’AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; ESMERALDO, P. C. V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S. de O. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta-Tensão*. Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM, 1992.
- DILOKRATANATRAKOOL, C.; AYUDHYA, P. N. N.; CHAYAVANICH, T.; PRA-PANAVARAT, C. Automatic detection-localization of fault point on waveform and classification of power quality disturbance waveshape fault using wavelet and neural network. *International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, p. 142–147, Oct 2003.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. H. *Electrical Power Systems Quality*. 2a.. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- FONSECA, J. R.; TAN, A. L.; MONASSI, V.; JUNQUEIRA, W. S.; SILVA, R. P.; ASSUNÇÃO, L. A. R.; MELO, M. O. C. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission line. *IEEE Transaction on Power Delivery*, p. 687–694, April 1990.
- GIOVANINI, R.; COURRY, D. V. Classificação rápida de faltas em sistemas elétricos utilizando redes neurais artificiais. *Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, São José do Campos, p. 281–286, Jul 1999.
- GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. 2a.. ed. Canada: [s.n.], 1991.
- GROSS, C. A. *Power System Analysis*. 2a.. ed. USA: [s.n.], 1986.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *IEEE Standard Common Format for Transient Data exchange (COMTRADE) for Power Systems*. New York, USA, 1991.

- IEEE STD C37.104-2002. *IEEE Guide for Automatic Reclosing of Line Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines*. New York, USA, Apr 2003.
- JIANG, J.-A.; FAN, P.-L.; CEN, C.-S.; YU, C.-S.; SHEU, J.-Y. A fault detection and faulted-phase selection approach for transmission lines with haar wavelet transforms. *Proc. 2003 IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exp.*, v. 1, p. 285–289, Dallas, USA, Sept 2003.
- JOHNS, A. T.; AGGARWAL, R. K.; BO, Z. Q. Non-unit protection technique for ehv transmission systems based on fault-generated noise. *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, v. 141, n. 2, p. 133–140, March 1994.
- KEZUNOVIC, M.; RIKALO, I. Detect and classify transmission line faults using neural nets. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 9, n. 4, p. 42–47, Oct 1996.
- KEZUNOVIC, M.; VASILIC, S.; GUL-BAGRIYANIK, F. Advanced approaches for detecting and diagnosing transients and faults. *Mediterranean Conference on Power Generation*, Athens, Greece, Nov 2002.
- KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transform in power systems: Parte 2 examples of application to actual power system transients. *IEE Power Engineering Journal*, p. 193–202, Aug 2001.
- LEE, C. H.; LEE, J. S.; KIM, J. O.; NAM, S. W. Feature vector extraction for the automatic classification of power quality disturbance. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Hong Kong, Chine, p. 2681–2684, June 1997.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP - Alternative Transient Program*: Rule book. Herverlee, Belgium, 1987.
- MAHANTY, R. N.; GUPTA, P. B. D. Application of rbf neural network to fault classification and location in transmission lines. *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, v. 151, n. 2, Mar 2004.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 11, n. 7, Jul 1989.

- MISITI, M.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J. M. Wavelet toolbox. 2002.
- MO, F.; KINSNER, W. Wavelet modelling of transients in power systems. *IEEE Conference on Communications, Power and Computing*, Winnipeg, MB, p. 132–137, May 1997.
- MURO, V. H. O.; URIBE, F. A.; ROBLES, J. A. G.; FERRER, H. J. A. Arcing faults patterns for based ann relays for transmission lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, June 2003.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. Discrete-time signal processing. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1989.
- PARSONS, A. C.; GRADY, W. M.; POWERS, E. J. A wavelet-based procedure for automatically determining the beginning and end of transmission system voltage sags. *IEEE Power Engineering Society*, v. 2, p. 1310–1315, Feb. 1999.
- POISSON, O.; RIOUAL, P.; MEUNIER, M. Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform. *International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP*, p. 1125–1130, Athens, Greece, Oct. 1998.
- PRADHAN, A. K.; ROUTRAY, A.; PATI, S.; PRADHAN, D. K. Wavelet fuzzy combined approach for fault classification of a series-compensated transmission line. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 19, n. 4, Oct 2004.
- PROBERT, S. A.; SONG, Y. H. Detection and classification of high frequency transients using wavelet analysis. *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, v. 2, p. 801–806, Chicago, USA, July 2002.
- REDDY, V. M.; RAO, S. S. Wavelets for detection and analysis of power system transients. *Conference Record of the Thirty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, Nov 1998.
- RESENDE, J. W.; CHAVES, M. L. R.; PENNA, C. Identification of power quality disturbance using the matlab wavelet transform toolbox. *IV International Conference on Power Systems Transients*, june 2001.
- SANKARAN, C. *Power Quality*. Boca Raton, USA: CRC PRESS, 2002.

- SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis. *IEEE International Symposium*, p. 166–169, Oct 1994.
- SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 3, p. 1250–1256, July 1997.
- SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M.; HOFMANN, P. Power quality assessment via wavelet transform analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 924–930, April 1996.
- Shah Baki, S. R.; ABDULLAH, M. Z.; ABIDIN, A. F. Combination wavelets and artificial intelligent for classification and detection transient overvoltage. *2002 Student conference on Research and Development Proceedings*, p. 177–180, 2002.
- SILVA, K. M. *Diagnóstico de Falhas em Linhas de Transmissão Baseado em Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- SILVA, S. S. B. da. *Uso de Inteligência Artificial para Análise de Ocorrências em Sistemas de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.
- SOLANKI, M.; SONG, Y. H. Transient protection of ehv transmission line using discrete wavelet analysis. *Proc. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, v. 3, p. 1868–1873, Toronto, Canada, July 2003.
- SOLANKI, M.; SONG, Y. H.; POTTS, S.; PERKS, A. Transient protection of transmission line using wavelet transform. *Developments in Power System Protection*, Amsterdam, Netherlands, n. 479, p. 299–302, 2001.
- SONG, Y. N.; XUAN, Q. Y.; JOHNS, A. T. Comparison studies of five neural network based fault classifiers for complex transmission lines. *Electrical and Computer Engineering*, v. 2, n. 3, p. 26–29, May 1996.
- SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; NEVES, W. L. A.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B.; DANTAS, K. M. C.; FONTES, A. V.; FERNADES, A. B.; LIRA, M. M. S. *Implantação de Técnicas*

de Inteligência Artificial para Identificação e Análise de Ocorrências no Sistema Elétrico.

Campina Grande: [s.n.], Jul 2004. Relatório de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento CT-I-92.2002.2420.00.

SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B.; DANTAS, K. M. C.

Classificação de Distúrbios no Sistema Elétrico Baseada nas Wave-nets. Campina

Grande: [s.n.], Jan 2006. Relatório de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento CT-I-93.2003.5710.00.

YOUSSEF, O. A. S. Fault classification based on wavelet transforms. *Transmission and*

Distribution Conference and Exposition, Atlanta, USA, v. 1, p. 531–536, Nov 2001.

YOUSSEF, O. A. S. Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for

power system relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, Apr 2004.

ZANETA Jr., L. C. *Trasitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Editora da

Universidade de São Paulo, 2003.

REDE OSCILOGRÁFICA DA CHESF

A rede oscilográfica da CHESF (Figura A.1) é basicamente constituída por:

- RDP: equipamentos responsáveis pela coleta dos dados.
- Concentradores: computadores com a função de fazer a varredura dos RDP a eles interligados, em busca de registros de ocorrências. No caso de estarem ligados em rede, eles realizam a transferência dos registros adquiridos diretamente para o servidor central da oscilografia.
- Servidor central da oscilografia: tem a função de hospedar o banco de dados da oscilografia e compartilhar as informações na rede corporativa da empresa, para os diversos usuários.
- Usuário final: dividido em vários grupos, conforme o interesse nos registros oscilográficos. Alguns grupos realizam a análise do desempenho da rede, enquanto que outros estudam as causas das perturbações junto às atuações dos dispositivos de proteção.

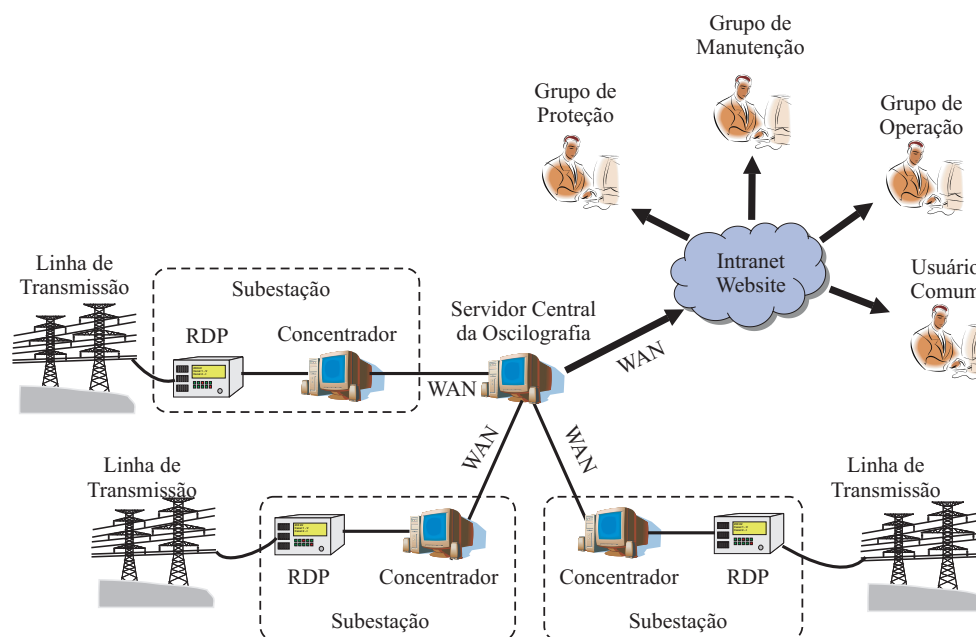


Figura A.1. Rede de oscilografia.

As informações coletadas automaticamente pelos concentradores são organizadas em registros oscilográficos padronizados no formato COMTRADE (Apêndice B).

No caso particular da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, a rede oscilográfica é composta por cerca de 400 pontos de monitoramento, cobrindo todos os sistemas de 500 kV e 230 kV e boa parte dos sistemas de 138 kV e 69 kV.

PADRÃO COMTRADE

As informações geradas pelos RDP e programas de simulação têm feito com que quantidades cada vez maiores de dados se formem continuamente. Estas informações podem ser geradas, transmitidas e armazenadas em diferentes formatos, dependendo do sistema de aquisição e transmissão empregado.

A diversidade de formatos dificultava a análise dos dados, uma vez que exige mais do analista, até que adotou-se em 1991 o padrão COMTRADE¹ (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1991): Um formato aberto, para o qual todos os outros formatos pudessem ser convertidos. Este padrão foi revisado em 1997 e em 1999, definindo um formato comum dos arquivos de dados que possibilita o intercâmbio dos arquivos entre os vários sistemas de análise de falta, testes e simulação.

Três tipos de arquivos são gerados no padrão COMTRADE. Cada qual possui uma classe específica de informação. O nome desses arquivos tem extensão que designa o tipo (Tabela B.1).

Tipo	Extensão
Cabeçalho	<i>.hdr</i>
Configuração	<i>.cfg</i>
Dados	<i>.dat</i>

Tabela B.1. Tipos de arquivos do padrão COMTRADE.

Os arquivos são seqüenciais e os campos de cada registro são delimitados por vírgula. Isto é, as informações são organizadas em linhas numa ordem padronizada, sendo os dados em cada linha separados por vírgulas.

¹IEEE Standard COMmon Format for TRAnsient Data Exchange for Power Systems

●**Arquivos de cabeçalho:** São arquivos de texto criados pelo programa conversor com o objetivo de permitir que os dados possam ser impressos e entendidos pelo usuário. Arquivos deste tipo podem conter qualquer informação desejada. Por exemplo: nome da subestação, identificação do equipamento (linha de transmissão, transformador, reator, dentre outros), comprimento da linha, relação de transformação do transformador de potencial ou de corrente e localização do defeito. As informações contidas nesses arquivos dependem apenas do conversor fornecido pelo fabricante do dispositivo de registro.

●**Arquivos de configuração:** São criados pelo programa conversor como um arquivo de texto. O formato dos dados é predefinido para que possam ser lidos e interpretados corretamente pelo programa computacional de análise, o qual os associará aos valores armazenados no arquivo de dados correspondente. Os arquivos de configuração são organizados conforme a Tabela B.2.

O campo *cccc* no registro tipo 3 quase não é usado. O fator de conversão do canal é $ax+b$, sendo a e b números reais dados nos campos correspondentes do registro tipo 3. x é o valor da amostra do arquivo *.dat* a ser convertido. Isto é, o valor convertido de x corresponde a $ax+b$ em unidades *uu* especificadas no campo correspondente.

●**Arquivos de dados:** São arquivos do tipo ASCII, ou binário, criados pelo programa conversor. Os dados de um arquivo deste tipo possuem formato predefinido de modo que possam ser lidos e interpretados pelo programa de análise, o qual os associará conforme especificado no arquivo de configuração correspondente.

Um arquivo de dados deve conter os valores organizados em linhas e colunas, de modo que cada linha corresponda a um conjunto de valores da primeira amostra de canal precedido de um número seqüencial e o tempo do conjunto de amostras. Cada linha possui $n + 2$ colunas, se n é o número de canais do registro. O número de linhas varia de acordo com o de amostras, o que define o tamanho do arquivo.

A primeira coluna deve conter o número da amostra. A segunda, o tempo da amostra, em microssegundos, do início do registro. As demais colunas devem conter os valores amostrados da tensão, da corrente e do estado, os quais devem ser inteiros com seis dígitos e separados por vírgula. Valores inexistentes devem ser representados por 999999 e as informações de estado por 0 ou 1. Nenhuma outra informação deve constar num arquivo de dados.

Nº Registro	Campo	Descrição do campo
1	Nome e identificação da subestação <i>Station name</i> <i>id</i>	Nome da subestação Nome do registrador
2	Número e tipo de canais <i>TT</i> <i>nnt,nnt</i>	Número total de canais Número de canais do tipo <i>t</i> <i>t = A</i> : analógico / <i>D</i> : digital
3	Nome dos canais, unidades, fatores de conversão e informações dos canais <i>nm, id</i> <i>p</i> <i>cccccc</i> <i>uu</i> <i>a, b</i> <i>skew</i> <i>min,max</i> <i>m</i>	Número e nome do canal Identificação de fase (A,B,C,T) Circuito ou componente monitorado Unidade do canal (V,A,kV,etc.) Componentes do fator de conversão Número real Menor e maior valor da taxa de amostragem do canal <i>id</i> Estado normal ou de alarme do canal (apenas para canais digitais)
4	Frequência nominal <i>if</i>	Frequência nominal em Hz 50, 60
5	Taxa de amostragem e número de amostras <i>nrates</i> <i>sssss1, endsamp1</i> : <i>sssssn, endsampn</i>	Nº. de taxas de amostragem diferentes no arquivo <i>.dat</i> Taxa de amostragem em Hz e última amostra nessa taxa
6	Data e hora da primeira amostra <i>mm/dd/yy</i> <i>hh:mm:ss.ssssss</i>	Mês, dia e últimos dígitos do ano Hora, minuto e segundo
7	Data e hora do trigger <i>mm/dd/yy</i> <i>hh:mm:ss.ssssss</i>	Mês, dia e últimos dígitos do ano Hora, minuto e segundo
8	Tipo de arquivo de dados <i>Ft</i>	Informa se o arquivo de dados é ASCII ou binário

Tabela B.2. Registros e campos dos arquivos de configuração.

SISTEMA WAVAN[©]

O sistema Wavan[©] (SOUZA *et al.*, 2006) é um *software* responsável pela análise automática de registros oscilográficos, resultado de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da CHESF e Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) intitulado *Classificação de Distúrbios no Sistema Elétrico Baseada nas Wave-nets*. O projeto foi desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Elétricos da UFCG, no período de agosto de 2004 a dezembro de 2005.

O Wavan[©], desde janeiro de 2006, está sendo instalado nos micro concentradores de diversas subestações do sistema CHESF. O seu funcionamento consiste em analisar os dados provenientes dos canais analógicos dos registros oscilográficos, identificando se os mesmos contêm informações sobre algum tipo de distúrbio¹ que tenha ocorrido no sistema.

Ao constatar a ocorrência de um distúrbio em um registro oscilográfico, após a etapa de detecção de distúrbios, o Wavan[©] emite um relatório com o diagnóstico do distúrbio e permite a transferência do registro para o servidor central da oscilografia. Em se tratando de falta, seus instantes inicial e final e o tipo da falta são obtidos e adicionados ao relatório. Caso constate que o registro não corresponde a nenhum distúrbio, o Wavan[©] evita sua transferência para o servidor central da oscilografia (Figura C.1). Nesse caso, o registro é armazenado temporariamente no próprio micro concentrador, para uma posterior coleta pelo pessoal responsável.

As regras utilizadas para detecção de distúrbios, delimitação do intervalo de falta e classificação de falta são baseadas na transformada wavelet discreta.

O sistema Wavan[©] foi desenvolvido na plataforma de programação Visual Studio .net, utilizando-se linguagem de programação C++.

¹Os distúrbios considerados são: faltas, afundamentos de tensão e transitórios devidos às manobras de chaveamento, a exemplo de energização e desligamento de LT e chaveamento de banco de capacitores.

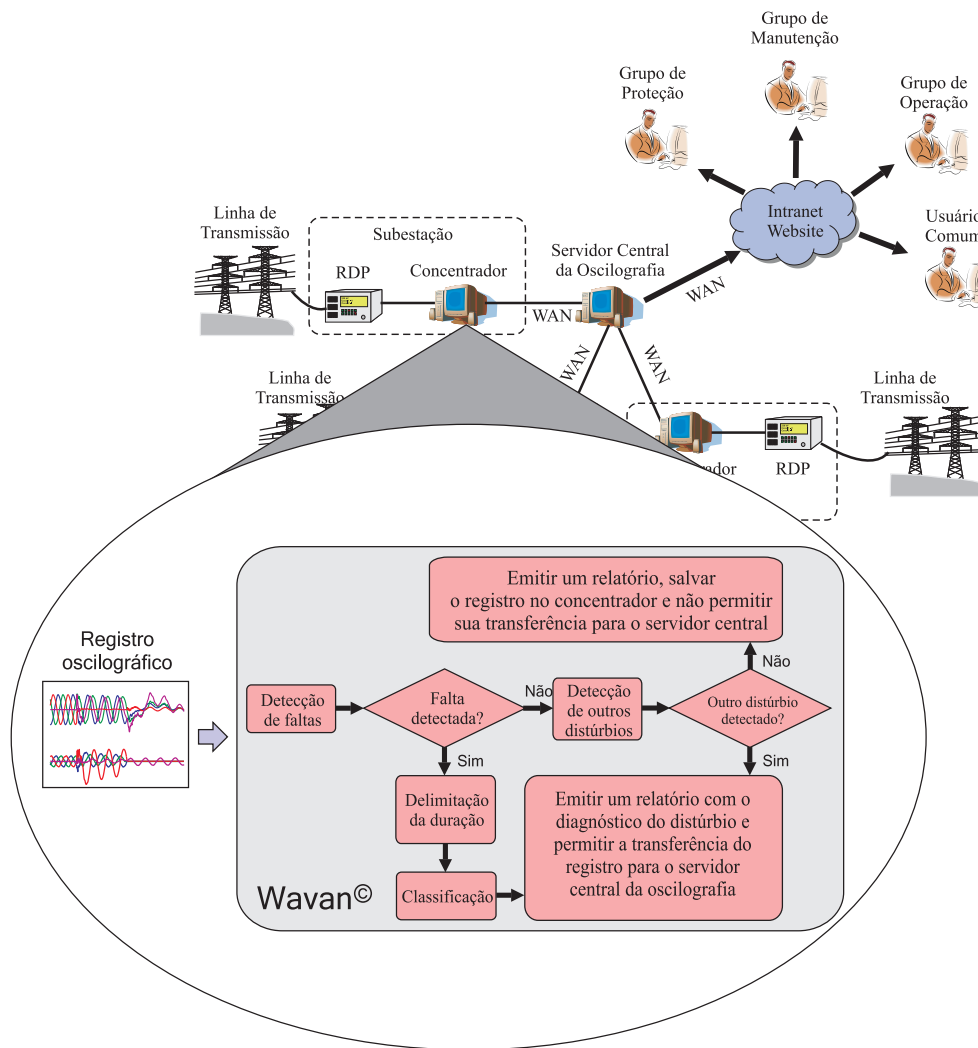


Figura C.1. Diagrama simplificado de integração do Wavan[©] ao sistema de monitoramento de uma linha de transmissão.

APÊNDICE D

SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA CHESF

Na Figura D.1 apresenta-se o diagrama unifilar do sistema de transmissão da CHESF, composto por LT de 500, 230, 138 e 69 kV.

Conforme a notação utilizada, uma LT é notificada por quatro dígitos. Por exemplo, no subsistema leste entre as subestações de Campina Grande II e Natal II há quatro LT, denominadas de 04V1, 04V2, 04V3 e 04V4. Os dois primeiros dígitos indicam o nível de tensão da LT (Tabela D.1).

Linha de transmissão	Nível de tensão (kV)
02XX	69
03XX	138
04XX	230
05XX	500

Tabela D.1. Nível de tensão das linhas de transmissão.

Nessa dissertação utiliza-se a nomenclatura 04V4_CGD-NTD para fazer referência a LT 04V4 entre as subestações de Campina Grande II e Natal II. Desta forma, um registro oscilográfico obtido na LT 04V4_CGD-NTD significa que o RDP estava monitorando o terminal da LT em Campina Grande II, enquanto que um registro obtido na LT 04V4_NTD-CGD estava monitorando o outro terminal, em Natal II.

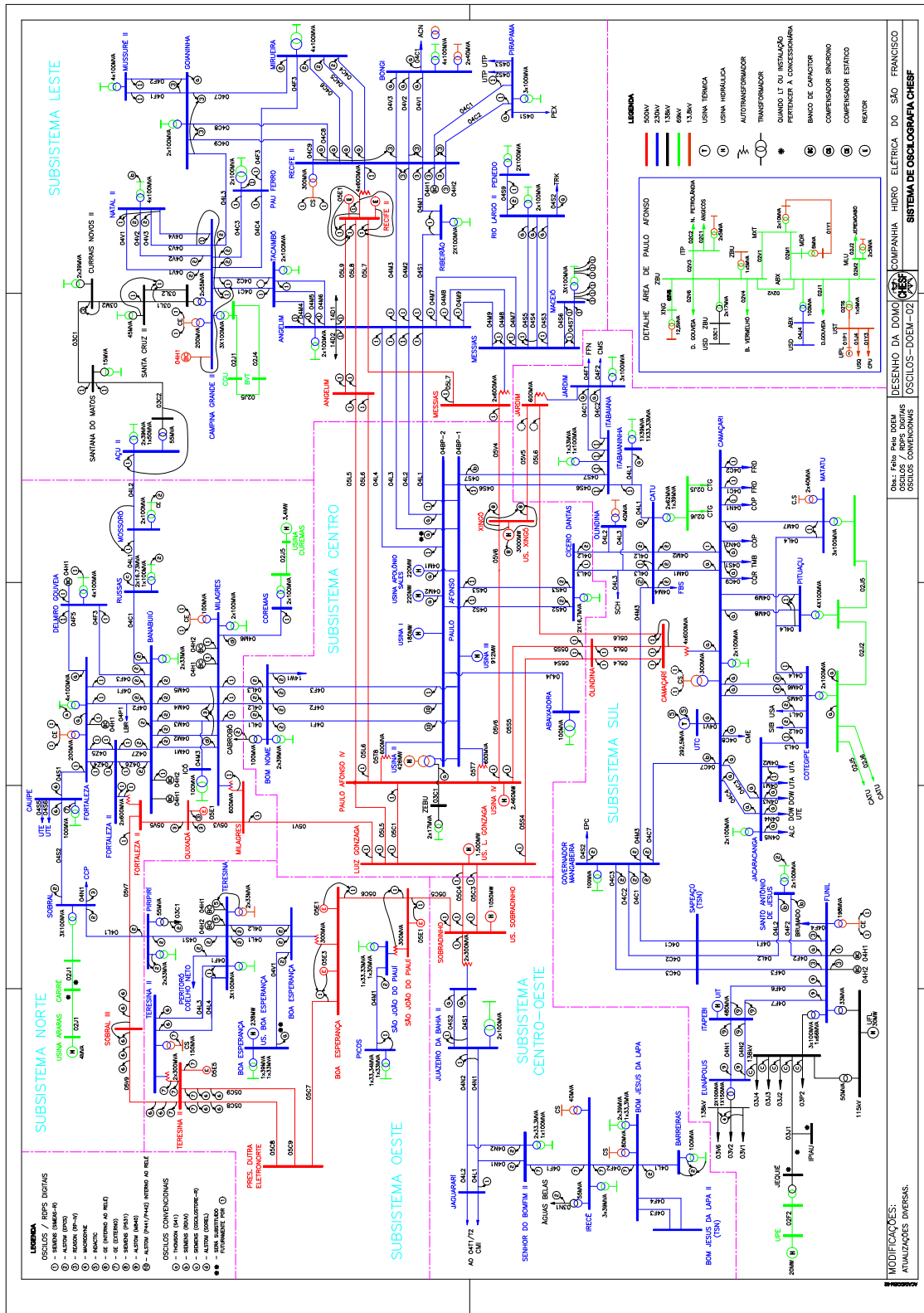


Figura D.1. Diagrama unifilar do sistema de transmissão da CHESF.

PUBLICAÇÕES EM EVENTOS

SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; DANTAS, K. M. C.; COSTA, F. B.; SILVA, S. S. B. Detecção e Classificação de faltas a partir da análise de registros oscilográficos via redes neurais artificiais e transformada wavelet. *Revista Controle & Automação*, 2006.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, K. M.; DANTAS, K. M. C. A wavelet-based algorithm for fault classification using oscillographic data. *International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP*, Cascais, Portugal, out. 2006.

COSTA, F. B.; SILVA, K. M.; DANTAS, K. M. C.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. A wavelet-based method for fault clearing time delimitation. *XII Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, Salvador, Brasil, out. 2006.

SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; DANTAS, K. M. C.; COSTA, F. B.; SILVA, J. A. C. B. Haar wavelet-based method for fast fault classification in transmission lines. *IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference - T&D*, Caracas, Venezuela, Ago. 2006.

COSTA, F. B.; SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; DANTAS, K. M. C.; BRITO, N. S. D. A method for fault classification in transmission lines based on ANN and wavelet coefficients energy. *2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence - WCCI*, Vancouver, Canada, Jul. 2006.

COSTA, F. B.; DANTAS, K. M. C.; SILVA, K. M.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. Discrete Wavelet Transform Applied for Analysis of Power System Transients. *Simpósio Brasileiro de Sistemas elétricos - SBSE*, Campina Grande, Brasil, Jul. 2006.

COSTA, F. B.; SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; DANTAS, K. M. C. Discrete wavelet transform based algorithm for transmission line fault classification. *VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais - INDUSCON*, Recife, Brasil, Mar. 2006.

SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, K. M.; DANTAS, K. M. C.; COSTA, F. B.; Leitão, J. J. A. L.; Lira, M. M. S. Aplicação de técnicas de inteligência artificial na análise de ocorrência no sistema: Neuranálise[©]. *III Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL*, Florianópolis, Brasil, Dez. 2005.

SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; COSTA, F. B.; DANTAS, K. M. C. Um Algoritmo para Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseado em Transformada Wavelet e RNA. *VII Congresso Brasileiro de Redes Neurais - CBRN*, Natal, Brasil, Out. 2005.

SILVA, K. M.; COSTA, F. B.; DANTAS, K. M. C.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, S. S. B. Diagnóstico de Faltas em Linhas de Transmissão Baseado em Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet. *VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI*, São Luiz, Brasil, Out. 2005.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, K. M.; DANTAS, K. M. C.; SILVA, S. S. B. Determinação da Duração de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada na Transformada Wavelet. *VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE*, Belém, Brasil, Ago. 2005.