

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

Tese

Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios
Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso
em Registradores Digitais de Perturbação

Flávio Bezerra Costa

Flávio Bezerra Costa

Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios
Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso
em Registradores Digitais de Perturbação

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.

Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.

Orientadores

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Julho de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C373t Costa, Flávio Bezerra.

Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação / Flávio Bezerra Costa. - Campina Grande, 2010.
201f.: il. col.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientadores: Prof^o Dr. Benemar Alencar de Souza, Prof^a. Dr^a. Núbia Silva Dantas Brito.

Referências.

1. Análise Oscilográfica. 2. Detecção em Tempo Real de Distúrbios.
3. Classificação em Tempo Real de Faltas. 4. Transformada Wavelet. I.
Título.

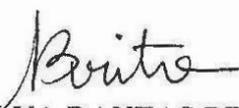
CDU- 621.317.35(043)

**UMA TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO EM TEMPO REAL DE DISTÚRBIOS
TRANSITÓRIOS BASEADA NA TRANSFORMADA WAVELET PARA USO EM
REGISTRADORES DIGITAIS DE PERTURBAÇÃO**

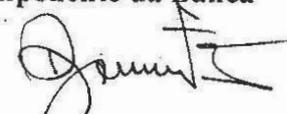
FLÁVIO BEZERRA COSTA

Tese Aprovada em 09.07.2010


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


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


JACQUELINE GISELE ROLIM, Dr., UFSC
Componente da Banca


DJALMA MOSQUEIRA FALCÃO, Ph.D., COPPE/UFRJ
Componente da Banca


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

MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG
Componente da Banca (Ausência Justificada)

**CAMPINA GRANDE – PB
JULHO - 2010**

*À memória do meu avô, Geraldo Duarte Bezerra,
que proporcionou todas as condições para que eu
chegasse até aqui.*

*À minha avó Maria Lúcia Bezerra e à minha mãe
Genilda Lúcia Bezerra.*

AGRADECIMENTOS

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

À Walcília A. Silva pelo grande incentivo em todos os momentos que passamos juntos, se mostrando uma companheira de grande valor.

Aos meus pais: Francisco A. da Costa e Genilda L. Bezerra; aos meus avós: Geraldo D. Bezerra e Maria Lúcia Bezerra pelo grande incentivo nessa caminhada; aos meus irmãos: Geraldo, Fabiano e Fabiana; e aos demais membros de minha família: Fábria, Genaldo, Geodir, Gerlane, Gilvanete, Ivone, Jeane, Júnior, Lameck, Marcone, Marinaldo, Marizélia, Meriane, Prazeres, Riphate e Rosinaldo que contribuíram na minha formação pessoal.

Aos professores Benemar A. Souza e Núbria S. D. Brito pela orientação necessária ao desenvolvimento desta tese e pela contribuição em minha formação acadêmica e profissional.

Aos professores Damásio F. Júnior, Edson G. Costa e Washington L. A. Neves pela disponibilidade e ajuda fornecida ao longo da pesquisa.

Aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições para enriquecer a tese de doutorado.

Aos amigos da universidade: Alessandro, Célio, Euler, Felipe, Ferdinando, Fídias, George, Gilvan, Jessiedna, João Paulo, José Antônio, Karcus, Kleber, Nelson, Paulo, Tarso, Wellinsílvia, Wellison e Wilker pela participação direta ou indireta no desenvolvimento dessa pesquisa e pela amizade conquistada.

Aos amigos de infância: Adeilton, Alexandre, André Luíz, Clodenildo, Diógenes, Eduardo, Érica, Erivaldo, Fernando, José Laudelino, José Pereira, Maurício, Nélio, Pablo, Roberto, Sueli e Waldemir pela amizade cultivada durante tanto tempo.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG (COPELE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e apoio

financeiro para realização deste trabalho.

Ao funcionários do Laboratório de Alta Tensão (LAT) e da COPELE.

Aos demais que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho digo, sinceramente, Muito Obrigado.

Flávio Bezerra Costa

RESUMO

Um método de diagnóstico de distúrbios transitórios baseado na análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes em sistemas elétricos de potência é proposto nesta tese. Em tempo real, o método é capaz de detectar os principais distúrbios com transitórios, tais como faltas, faltas evolutivas, afundamentos de tensão e transitórios devido às manobras de chaveamento. O método também identifica os instantes inicial e final dos distúrbios e classifica as faltas e faltas evolutivas em tempo real. Como aplicação da metodologia proposta, um novo registrador digital de perturbações com gatilhamento controlado pelo método de diagnóstico de distúrbios foi implementado em um simulador digital de sistemas elétricos em tempo real, o *Real Time Digital Simulator* (RTDSTM), no qual apenas distúrbios transitórios são detectados. Quando isto ocorre, as tensões e correntes no ponto monitorado são armazenados em forma de registros oscilográficos, com os canais analógicos e digitais usuais, além de canais digitais com o diagnóstico dos distúrbios. O método de diagnóstico de distúrbios foi avaliado em tempo real no RTDSTM, considerando dois modelos de sistemas elétricos em várias situações de distúrbios, apresentando bons resultados. A versão *off-line* do método de diagnóstico de distúrbios também foi avaliada com mais de dois mil registros oscilográficos reais, capturados por registradores digitais de perturbação instalados no sistema de transmissão da Chesf, apresentando bons resultados. A etapa de classificação de faltas apresentou bons resultados, independente da resistência, ângulo de incidência e localização das faltas. Além da análise em tempo real e *off-line* dos diversos distúrbios transitórios por meio de uma única técnica, outra contribuição do método é a sua generalização, visto que ocorrências provenientes de sistemas elétricos de diversas topologias, com diferentes classes de tensão e taxas de amostragem foram diagnosticadas corretamente.

Palavras-chave: Análise oscilográfica; detecção em tempo real de distúrbios; classificação em tempo real de faltas; transformada *wavelet*.

ABSTRACT

This thesis presents a transient disturbance diagnostic method based on the real-time analysis of the wavelet coefficient energies of both the voltages and currents. The method detects the main transient disturbances in transmission power systems, such as faults, developing faults, voltage sags, and switching transients. The method also detects the beginning and end times of the disturbances, and classifies the faults and developing faults in real-time. A new wavelet-based digital fault recorder with the proposed method as triggering method was implemented in the Real Time Digital Simulator (RTDSTM) in order to detect and record only oscillographic data with transient disturbances. In this monitoring device, the disturbance diagnostic information is recorded into the digital channels of the oscillographic data. The performance of the proposed method was real-time assessed with two power system models with faults and other transient disturbances and good results were achieved. The performance of the method was also off-line evaluated with more than two thousand actual oscillographic records from digital fault recorders of the Chesf power system and good results were also obtained. The fault classification module was assessed with various fault resistances, inception angles, and locations and good results were obtained. The distinctive feature of the method is that it could be used to detect and classify the main transient disturbances in nonspecific power system topologies, with different sampling rates and rated voltages, and in both the real-time and off-line applications.

Keywords: Oscillographic analysis; real-time disturbance detection; real-time fault classification; wavelet transform.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xxv
Lista de Abreviaturas	xxvii
Lista de Símbolos	xxix
Capítulo 1– Introdução	1
1.1 Relevância da Tese	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos da Tese	3
1.4 Contribuições da Tese	4
1.5 Organização do Texto	6
Capítulo 2– Revisão Bibliográfica	8
2.1 Detecção e Classificação de Distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica	9
2.1.1 Métodos Baseados na Transformada <i>Wavelet</i>	9
2.1.2 Métodos Híbridos	11
2.2 Detecção e Classificação de Faltas	13
2.2.1 Métodos Baseados na Transformada <i>Wavelet</i>	13

2.2.2	Métodos Baseados em Redes Neurais Artificiais	15
2.2.3	Métodos Híbridos	15
2.3	Resumo da Revisão Bibliográfica	16
Capítulo 3– Fundamentos da Transformada <i>Wavelet</i>		20
3.1	Algoritmo de Mallat para Cálculo da TWD	21
3.2	Filtros <i>Wavelet</i> e Filtros Escala da TWD	23
3.3	Algoritmo Piramidal para Cálculo da TWD - Forma Matricial	25
3.4	Efeito da Subamostragem no Cálculo dos Coeficientes <i>Wavelet</i> da TWD	30
3.5	Filtros <i>Wavelet</i> e Filtros Escala da TWDR	31
3.6	Algoritmo Piramidal para Cálculo da TWDR - Forma Matricial	32
3.7	Coeficientes <i>Wavelet</i> da TWD e da TWDR em Tempo Real	34
3.8	Energia dos Coeficientes <i>Wavelet</i> e de Aproximação	36
3.9	Síntese do Capítulo	44
Capítulo 4– Diagnóstico de Distúrbios Transitórios		45
4.1	Transitórios	45
4.1.1	Transitórios Impulsivos	46
4.1.2	Transitórios Oscilatórios	47
4.2	Registros Oscilográficos sem Distúrbios Transitórios	47
4.3	Faltas	52
4.4	Faltas Evolutivas	60
4.5	Afundamentos de Tensão	61
4.6	Energizações de Linhas de Transmissão	65
4.6.1	Energização de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto em Aberto	66
4.6.2	Energização de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto Fechado	72

4.7	Desligamentos de Linhas de Transmissão	74
4.7.1	Desligamento de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto Fechado	74
4.7.2	Desligamento de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto em Aberto	78
4.8	Energização de Bancos de Capacitores	79
4.9	Desligamento de Bancos de Capacitores	82
4.10	Múltiplos Distúrbios Transitórios	84
4.11	Tentativa de Religamento de uma Linha de Transmissão com Falta	86
4.12	Detecção em Tempo Real dos Distúrbios Transitórios	87
4.13	Síntese do Capítulo	90
Capítulo 5– Falhas em Sistemas de Transmissão		92
5.1	Modelo do Sistema Elétrico	92
5.2	Influência do Ângulo de Incidência de Falta na Energia dos Transitórios	94
5.2.1	Faltas Monofásicas	95
5.2.2	Faltas Bifásicas	102
5.2.3	Faltas Bifásicas para Terra	105
5.2.4	Faltas Trifásicas	108
5.2.5	Efeito da <i>Wavelet</i> Mãe	109
5.2.6	Efeito da Escala <i>Wavelet</i>	110
5.3	Influência da Resistência de Falta na Energia dos Transitórios	110
5.4	Coordenadas de Falta	113
5.5	Energia dos Coeficientes de Aproximação	121
5.6	Método de Classificação de Falhas	123
5.7	Síntese do Capítulo	127

Capítulo 6– Implementações em Tempo Real	128
6.1 Modelagem do RDP	128
6.1.1 O RDP no Módulo <i>Draft</i>	131
6.1.2 O RDP no Módulo <i>Runtime</i>	132
6.2 Modelagem dos Sistemas Elétricos de Potência	134
6.2.1 Sistema Elétrico de 230 kV	134
6.2.2 Sistema Elétrico de 500 kV	135
6.3 Síntese do Capítulo	135
Capítulo 7– Análise dos Resultados	136
7.1 Avaliação dos Resultados em Simulações em Tempo Real - Sistema Elétrico de 230 kV	136
7.1.1 Base de dados 1: faltas na linha de transmissão 1	136
7.1.2 Base de dados 2: faltas na linha de transmissão 3	146
7.1.3 Base de dados 3: faltas evolutivas na linha de transmissão 1	150
7.2 Avaliação dos Resultados em Simulações em Tempo Real - Sistema Elétrico de 500 kV	156
7.2.1 Base de dados 4: Faltas Seguidas por Religamento Automático da Linha de Transmissão	156
7.3 Avaliação dos Registros Oscilográficos Reais	161
7.3.1 Registros Oscilográficos sem Distúrbios Transitórios	162
7.3.2 Registros Oscilográficos com Falta	162
7.3.3 Registros Oscilográficos com Afundamentos de Tensão	164
7.3.4 Registros Oscilográficos com Transitórios de Chaveamento	165
7.3.5 Registros Oscilográficos com Energização e Desligamentos de Linhas de Transmissão	165

7.3.6	Registros Oscilográficos com Energização e Desligamento de Banco de Capacitores	166
7.3.7	Registros Oscilográficos com Múltiplos Distúrbios	167
7.4	Síntese do Capítulo	167
Capítulo 8– Conclusões e Pespectivas de Continuação		170
Apêndice A– Registradores Digitais de Perturbações		174
Apêndice B– Ferramenta de Simulação em Tempo Real		177
B.1	<i>Hardware</i> do RTDS TM	178
B.2	<i>Software</i> do RTDS TM	179
B.2.1	Módulo <i>Component Builder (CBuilder)</i>	180
B.2.2	Módulo <i>Draft</i>	180
B.2.3	Módulo <i>Runtime</i>	182
Apêndice C– Método da Sobrecorrente para Detecção e Classificação de Faltas		183
Apêndice D– Método do Valor RMS das Tensões para Detecção de Afundamentos de Tensão		185
Referências Bibliográficas		186
Índice Remissivo		197

LISTA DE FIGURAS

3.1	Análise em tempo real das amostras de tensão e corrente.	20
3.2	Bloco da TWD.	22
3.3	Três estágios da TWD.	23
3.4	Resposta em frequência dos filtros escala e <i>wavelet</i> da Daubechies 4: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala.	25
3.5	Sinal original.	29
3.6	Coefficientes após aplicação da TWD: (a) aproximação; (b) <i>wavelet</i>	29
3.7	Efeito da subamostragem na identificação de distorções: (a) sinal original; (b) coeficientes <i>wavelet</i>	30
3.8	Cálculo dos coeficientes <i>wavelet</i> da TWDR: (a) sinal original; (b) coeficientes <i>wavelet</i>	33
3.9	TWD em tempo real: (a) sinal original; (b) coeficientes <i>wavelet</i>	35
3.10	TWDR em tempo real: (a) sinal original; (b) coeficientes <i>wavelet</i>	35
3.11	Sinal teste.	38
3.12	Resposta em frequência dos filtros escala e <i>wavelet</i> da Daubechies 4: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala; (d) quarta escala.	39
3.13	Energias: (a) transitórios; (b) coeficientes <i>wavelet</i> da primeira escala; (c) coeficientes <i>wavelet</i> da segunda escala; (d) coeficientes <i>wavelet</i> da terceira escala; (e) coeficientes <i>wavelet</i> da quarta escala.	40
3.14	Cálculo da energia janelada com o algoritmo em tempo real: (a) sinal teste; (b) coeficientes <i>wavelet</i> ; (c) energia janelada.	43

3.15	Cálculo em tempo real da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> da TWDR.	44
4.1	Descarga atmosférica no condutor de fase de uma linha de transmissão.	47
4.2	Registro oscilográfico real sem distúrbios: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	48
4.3	Registro oscilográfico sem distúrbios: (a) i_A sem a componente de frequência fundamental e harmônicas de ordem 2, 3, 4, 5 e 7; (b) histograma da frequência relativa dos ruídos de i_A	48
4.4	Análise <i>wavelet</i> de i_A : (a) coeficientes <i>wavelet</i> da primeira escala; (b) histograma da frequência relativa dos coeficientes <i>wavelet</i> da primeira escala.	49
4.5	Análise <i>wavelet</i> de i_A : (a) \mathcal{E}_{i_A} ; (b) histograma da frequência relativa de \mathcal{E}_{i_A}	50
4.6	Registro oscilográfico real sem distúrbios: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	50
4.7	Corrente i_A sem a componente de 60 Hz e as harmônicas de ordem 3 e 5.	50
4.8	Módulo das componentes harmônicas de i_A , por ciclo.	51
4.9	Análise <i>wavelet</i> : (a) coeficientes <i>wavelet</i> de i_A ; (b) \mathcal{E}_{i_A} ; (c) histograma da frequência relativa de \mathcal{E}_{i_A}	51
4.10	Registro oscilográfico real de uma falta CT: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	53
4.11	Registro oscilográfico com falta monofásica CT: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	56
4.12	Aumento brusco de energia em \mathcal{E}_{v_C} , na amostra k_{2E} , relacionada ao PT2.	57
4.13	Registro real com falta evolutiva: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	61
4.14	Energia janelada dos coeficientes <i>wavelet</i> da primeira escala de um registro real com falta evolutiva BT+BCT: (a) tensões; (b) correntes; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	61
4.15	Registro oscilográfico real com afundamento de tensão na fase C: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	62

4.16	Registro oscilográfico com afundamento de tensão na fase C: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	64
4.17	Registro oscilográfico com afundamento de tensão na fase C: (a) tensões de fase; (b) energia dos coeficientes de aproximação normalizadas; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	65
4.18	Energização de uma LT com o terminal remoto em aberto.	66
4.19	Energização de uma LT com o terminal remoto fechado.	66
4.20	Energização de uma linha de transmissão com um terminal em aberto, com monitoramento do terminal energizado: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	67
4.21	Energização de uma linha de transmissão com o terminal remoto em aberto, com monitoramento do terminal energizado: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	68
4.22	Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pela energização de uma outra linha de transmissão do sistema elétrico: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	69
4.23	Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pela energização de uma outra linha de transmissão do sistema elétrico: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	70
4.24	Energização de uma linha de transmissão com um terminal em aberto, com monitoramento no terminal remoto: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	70
4.25	Energização de uma linha de transmissão com um terminal em aberto, com monitoramento no terminal remoto: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	71
4.26	Energização de uma linha de transmissão com o terminal remoto fechado e monitoramento no terminal local: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	72

4.27 Energização de uma linha de transmissão com um terminal remoto fechado e monitoramento no terminal remoto: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	73
4.28 Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pela energização de uma outra linha de transmissão: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	73
4.29 Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal local: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	75
4.30 Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal local: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	76
4.31 Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pelo desligamento de outra linha de transmissão: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	76
4.32 Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pelo desligamento de outra linha de transmissão: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	77
4.33 Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal remoto: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	78
4.34 Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal remoto: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	78
4.35 Desligamento de uma LT com um terminal em aberto: (a) registro proveniente do terminal local; (b) registro proveniente do terminal remoto.	79
4.36 Registro oscilográfico real com energização de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	80
4.37 Energização de um banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	80
4.38 Registro oscilográfico real com transitórios de chaveamento devido à energização de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	81

4.39	Transitórios de chaveamento devido à energização de banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	81
4.40	Registro oscilográfico real com desligamento de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	82
4.41	Desligamento de um banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	82
4.42	Registro oscilográfico real com transitórios de chaveamento devido ao desligamento de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	83
4.43	Transitórios de chaveamento devido ao desligamento de banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	83
4.44	Registro oscilográfico real com uma falta seguido por um religamento automático: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	84
4.45	Registro oscilográfico real com afundamento de tensão seguido por transitórios de chaveamento: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	85
4.46	Energia janelada dos coeficientes <i>wavelet</i> de um registro real com uma falta seguido por um religamento automático: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico dos distúrbios.	85
4.47	Energia janelada dos coeficientes <i>wavelet</i> de um registro real com afundamento de tensão seguido por transitórios de chaveamento: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico dos distúrbios.	85
4.48	Registro oscilográfico real com uma tentativa de religamento automático de uma linha com falta: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	86
4.49	Tentativa de religamento automático de uma linha com falta: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.	87
4.50	Fluxograma do método de detecção em tempo real dos distúrbios transitórios.	89
4.51	Fluxograma do método de classificação de distúrbios.	90

4.52	Principais distúrbios transitórios em sistemas de transmissão: (a) energização de uma LT com o terminal remoto em aberto; (b) energização de uma LT com o terminal remoto fechado; (c) desligamento de uma LT com o terminal remoto fechado; (d) desligamento de uma LT com o terminal remoto em aberto; (e) energização/desligamento de banco de capacitores; (f) falta em uma LT.	91
5.1	Sistema elétrico analisado.	92
5.2	Ângulo de incidência de falta.	93
5.3	Esquema de aplicação de faltas em um trecho da linha de transmissão trifásica com parâmetros distribuídos.	94
5.4	Ondas viajantes que se propagam na linha de transmissão em uma falta AT. . .	96
5.5	Influência do ângulo de incidência de uma falta AT, nas tensões e correntes no local da falta: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$	97
5.6	Coefficientes <i>wavelet</i> das tensões no local da falta AT, para: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$	97
5.7	Coefficientes <i>wavelet</i> das correntes no local da falta AT, para: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$	97
5.8	Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das tensões e correntes, no local da falta: (a) falta AT; (b) falta BT; (c) falta CT. . .	98
5.9	Tempo de trânsito das ondas viajantes do local de falta até a barra 1.	100
5.10	Influência do ângulo de incidência de uma falta AT, nas tensões e correntes no terminal da linha e no local da falta: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$	100
5.11	Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das tensões e correntes na barra 1: (a) falta AT; (b) falta BT; (c) falta CT.	101
5.12	Fasor v_{Af} , v_{Bf} e v_{ABf} no instante de ocorrência de uma falta AB: (a) $\theta_f=60^\circ$; (b) $\theta_f=150^\circ$	103
5.13	Ondas viajantes que se propagam na LT em uma falta AB.	104
5.14	Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das tensões e correntes, no local de falta: (a) falta AB; (b) falta BC; (c) falta AC. . .	105

5.15	Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das correntes, no local de falta: (a) falta ABT; (b) falta BCT; (c) falta ACT.	106
5.16	Ondas viajantes que se propagam na LT em uma falta ABT.	106
5.17	Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das correntes, no local de falta, nas faltas AT, BT, AB e ABT: (a) $\mathcal{E}_{i_{Af}}$; (b) $\mathcal{E}_{i_{Bf}}$. . .	107
5.18	Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das faltas trifásicas, no local de falta: (a) $\mathcal{E}_{v_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{v_{Nf}}(\theta_f)$; (b) $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$	108
5.19	Efeito da <i>wavelet</i> mãe nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das correntes, no local das faltas AT: (a) db4; (b) db6; (c) db8; (d) db10; (e) db12.	109
5.20	Efeito da escala <i>wavelet</i> nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das correntes, no local das faltas AT: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala; (d) quarta escala.	110
5.21	Influência da resistência de uma falta AT, nas tensões e correntes no local da falta: (a) 10 Ω ; (b) 90 Ω	111
5.22	Efeito da resistência de falta nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> das tensões e correntes no local de falta: (a) falta AT; (b) falta AB; (c) falta ABC.	112
5.23	Registro oscilográfico real com falta CT: (a) i_A , i_B e i_C ; (b) \mathcal{E}_{i_A} ; (c) \mathcal{E}_{i_B} ; (d) \mathcal{E}_{i_C}	113
5.24	Triângulo de faltas.	114
5.25	Planos correspondentes às faltas monofásicas.	116
5.26	Planos correspondentes às faltas bifásicas.	116
5.27	Regiões geométricas referentes às faltas monofásicas e bifásicas.	117
5.28	Posição geométrica das coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas em função do ângulo de incidência de falta: (a) no local de falta; (b) na barra 1.	118
5.29	Posição geométrica das coordenadas das faltas bifásicas para a terra na barra 1 em função do ângulo de incidência de falta.	119
5.30	Posição geométrica das coordenadas das faltas trifásicas em função do ângulo de incidência de falta: (a) no local de falta; (b) na barra 1.	120

5.31	Posição geométrica das coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas em função da resistência de falta: (a) no local de falta; (b) na barra 1.	121
5.32	Efeito do ângulo de incidência de falta nas tensões e correntes, para $\theta_f=60^\circ$: (a) falta AB; (b) falta ABT; (c) falta ABC.	122
5.33	Diagrama de blocos do método de classificação parcial de faltas.	124
5.34	Coordenadas da falta CT referentes ao PT2.	125
5.35	Curvas de energia de um registro oscilográfico real com falta CT: (a) tensões; (b) correntes; (c) canais digitais.	125
5.36	Posição geométrica das coordenadas de uma falta AT que evolui para uma falta bifásica terra ou trifásica.	126
5.37	Posição geométrica das coordenadas da terceira etapa de uma falta evolutiva AT+ACT+ABCT.	126
6.1	Entradas e saídas do RDP proposto.	129
6.2	Arquitetura do RDP proposto.	130
6.3	Diagrama de blocos do RDP proposto no RTDS TM	131
6.4	Modelagem dos componentes do RDP no módulo <i>draft</i>	132
6.5	RDP no módulo <i>runtime</i>	133
6.6	Modelo de um sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE.	134
6.7	Modelo de um sistema elétrico de 500 kV.	135
7.1	Faltas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE.	137
7.2	Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta AT: (a) RDP1; (b) RDP2; (c) RDP3.	138
7.3	Histograma do número de faltas detectadas no RDP1 em função do número de amostras relacionadas ao tempo de detecção: (a) falta AT; (b) falta BT; (c) falta CT; (d) falta AB; (e) falta BC; (f) falta AC; (g) falta ABT; (h) falta BCT; (i) falta ACT; (j) falta ABC.	140

- 7.4 Registro oscilográfico do RDP1 obtido na simulação em tempo real de uma falta AT: (a) tensões; (b) correntes; (c) canais digitais com o diagnóstico da falta. . . . 141
- 7.5 Coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2. 142
- 7.6 Coordenadas das faltas bifásicas para a terra simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2. 143
- 7.7 Coordenadas das faltas trifásicas simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2. 143
- 7.8 Desempenho do método de classificação de faltas, nas amostras de energia em meio ciclo após o instante inicial da falta: (a) faltas monofásicas; (b) falta bifásicas. 144
- 7.9 Registros oscilográficos do RDP3 obtidos na simulação em tempo real de faltas AT em uma linha paralela: (a) registro com afundamento de tensão; (b) registro com afundamento de tensão amortecido; (c) registro com transitórios de chaveamento. 145
- 7.10 Energia janelada das tensões de fase dos registros oscilográficos do RDP3 obtidos na simulação em tempo real de faltas AT em uma linha paralela: (a) registro com afundamento de tensão; (b) registro com afundamento de tensão amortecido; (c) registro com transitórios de chaveamento. 145
- 7.11 Faltas na linha de transmissão 2 do sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE. 146
- 7.12 Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta AT: (a) RDP1; (b) RDP2; (c) RDP3; (d) RDP4. 147
- 7.13 Coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas simuladas na linha de transmissão 3 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP3; (b) RDP4. 149
- 7.14 Coordenadas das faltas bifásicas para a terra simuladas na linha de transmissão 3 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP3; (b) RDP4. 150
- 7.15 Coordenadas das faltas trifásicas simuladas na linha de transmissão 3 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP3; (b) RDP4. 150

7.16	Faltas evolutivas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE.	151
7.17	Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta evolutiva AT+ACT: (a) RDP1; (b) RDP2; (c) RDP3; (d) RDP4.	152
7.18	Coordenadas das faltas evolutivas AT+ACT simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.	154
7.19	Coordenadas das faltas evolutivas BT+BCT simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.	154
7.20	Coordenadas das faltas evolutivas AB+ABT simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.	155
7.21	Coordenadas das faltas evolutivas AB+ABC simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.	156
7.22	Sistema elétrico de 500 kV com falta na linha de transmissão.	157
7.23	Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta AT seguido de religamento automático: (a) RDP1; (b) RDP2.	158
7.24	Coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas do sistema elétrico de 500 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.	160
7.25	Coordenadas das faltas bifásicas para a terra do sistema elétrico de 500 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.	160
7.26	Coordenadas das faltas trifásicas do sistema elétrico de 500 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.	161
7.27	Registro real de uma falta AT: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)	163
7.28	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> dos sinais da falta AT: (a) tensões; (b) correntes.	163
7.29	Resultados da classificação de faltas em registros oscilográficos reais.	164
B.1	Interface do módulo <i>CBuilder</i>	181
B.2	Interface do módulo <i>Draft</i>	181
B.3	Interface do módulo <i>Runtime</i>	182

LISTA DE TABELAS

1.1	Artigos publicados em periódicos.	5
1.2	Artigos publicados em anais de eventos internacionais.	5
1.3	Artigos publicados em anais de eventos nacionais.	6
2.1	Resumo da revisão bibliográfica referente à análise de distúrbios de QEE.	17
2.2	Resumo da revisão bibliográfica referente ao diagnóstico de falta.	18
4.1	Categorias e características dos transitórios em sistemas elétricos de potência.	46
5.1	Dados da fonte do sistema de 230 kV.	93
5.2	Dados da linha de transmissão do sistema de 230 kV.	93
5.3	Valores das coordenadas de falta em função do tipo de falta.	115
6.1	Dados das fontes do sistema de 500 kV.	135
6.2	Dados da linha de transmissão do sistema de 500 kV.	135
7.1	Resultados obtidos com a ocorrência de faltas na linha 1 do sistema elétrico de 230 kV.	138
7.2	Resultados da detecção e classificação de faltas na linha 1 do sistema elétrico de 230 kV.	139
7.3	Resultados obtidos com a ocorrência de faltas na linha 3 do sistema elétrico de 230 kV.	147
7.4	Resultados da detecção e classificação de faltas na linha 3 do sistema elétrico de 230 kV.	148

7.5	Resultados obtidos nas simulações em tempo real de faltas evolutivas do sistema elétrico de 230 kV.	153
7.6	Resultados da classificação de faltas evolutivas no sistema elétrico de 230 kV. . .	153
7.7	Resultados obtidos com a ocorrência de múltiplos distúrbios no sistema elétrico de 500 kV.	158
7.8	Resultados da detecção e classificação de faltas no sistema elétrico de 230 kV. . .	159
7.9	Nível de tensão e taxa de amostragem dos registros oscilográficos reais dos principais distúrbios.	161
7.10	Resultados obtidos com os registros oscilográficos reais com falta.	162
7.11	Resultados obtidos com os métodos de classificação de falta.	164
7.12	Resultados obtidos com os registros oscilográficos reais com afundamentos de tensão.	165
7.13	Resultados obtidos com os registros oscilográficos com transitórios de chaveamento.	165
7.14	Resultados obtidos com os registros oscilográficos com energizações de LT. . . .	166
7.15	Resultados obtidos com os registros oscilográficos com desligamentos de LT. . .	166
7.16	Resultados obtidos com os registros oscilográficos com energizações e desligamentos de banco de capacitores.	166
7.17	Resultados obtidos com os registros oscilográficos com múltiplos distúrbios. . . .	167

LISTA DE ABREVIATURAS

AM	-	Análise multiresolução.
ATP	-	<i>Alternative transient program.</i>
Chesf	-	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
dbj	-	<i>Wavelet</i> mãe Daubechies <i>j</i> .
EMTP	-	<i>Electromagnetic transient program.</i>
Fapesq	-	Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba.
GSE	-	Grupo de Sistemas Elétricos.
GTAI	-	<i>Gigabit Transceiver Analogue Input Card.</i>
GTAO	-	<i>Gigabit Transceiver Analogue Output Card.</i>
GTDI	-	<i>Gigabit Transceiver Digital Input Card.</i>
GTDO	-	<i>Gigabit Transceiver Digital Output Card.</i>
GTFPI	-	<i>Gigabit Transceiver Front Painel Interface Card.</i>
GTNET	-	<i>Gigabit Transceiver Network Interface System Card.</i>
GUI	-	<i>Graphical User Interface.</i>
LT	-	Linha de transmissão.
ONS	-	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
PT	-	Período transitório.
QEE	-	Qualidade da energia elétrica.
RDP	-	Registrador digital de perturbação.
RMS	-	<i>Roots mean square.</i>
RNA	-	Rede neural artificial.

- RPROP - *Resilient propagation.*
- RTDS - *Real-Time Digital Simulator.*
- SDSE - Sistema de diagnóstico de distúrbios em sistemas elétricos.
- SIN - Sistema interligado nacional.
- TC - Transformador de corrente.
- TDF - Transformada discreta de Fourier.
- TNA - *Transient network analyzers.*
- TPC - Transformador de potencial capacitivo.
- TRF - Transformada rápida de Fourier.
- TW - Transformada *wavelet*.
- TWC - Transformada *wavelet* contínua.
- TWD - Transformada *wavelet* discreta.
- TWDR - Transformada *wavelet* discreta redundante.
- UFCG - Universidade Federal de Campina Grande.
- WIF - *Workstation interface.*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Coordenada de falta referente à corrente da fase A.
A_1	- Matriz com os coeficientes do filtro escala para o cálculo dos coeficientes de aproximação da TWD, por meio do algoritmo piramidal.
\tilde{A}_1	- Matriz com os coeficientes do filtro escala para o cálculo dos coeficientes de aproximação da TWDR, por meio do algoritmo piramidal.
B	- Coordenada de falta referente à corrente da fase B.
B_1	- Matriz com os coeficientes do filtro <i>wavelet</i> para o cálculo dos coeficientes <i>wavelet</i> da TWD, por meio do algoritmo piramidal.
\tilde{B}_1	- Matriz com os coeficientes do filtro <i>wavelet</i> para o cálculo dos coeficientes <i>wavelet</i> da TWDR, por meio do algoritmo piramidal.
β	- Ângulo de fase associado com o tempo de trânsito das ondas viajantes.
c	- velocidade de propagação das ondas viajantes.
C	- Coordenada de falta referente à corrente da fase C.
c_j	- Coeficientes de aproximação da escala j .
d_j	- Coeficientes <i>wavelet</i> da escala j .
d_f	- Distância entre o local de ocorrência de uma falta e o ponto de monitoramento (distância de falta).
\mathcal{E}	- Representa uma das energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} , \mathcal{E}_{i_N} , \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} ou \mathcal{E}_{v_N} .
\mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N}	- Energia janelada dos coeficientes <i>wavelet</i> , da primeira escala, de i_A , i_B , i_C e i_N , respectivamente.
\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} e \mathcal{E}_{v_N}	- Energia janelada dos coeficientes <i>wavelet</i> , da primeira escala, de v_A , v_B , v_C e v_N , respectivamente.
$\mathcal{E}_{i_{Af}}$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}$	- Energia janelada dos coeficientes <i>wavelet</i> , da primeira escala, de i_{Af} , i_{Bf} , i_{Cf} e i_{Nf} , respectivamente.

- $\mathcal{E}_{v_{Af}}, \mathcal{E}_{v_{Bf}}, \mathcal{E}_{v_{Cf}}$ e $\mathcal{E}_{v_{Nf}}$ - Energia janelada dos coeficientes *wavelet*, da primeira escala, de v_{Af} , v_{Bf} , v_{Cf} e v_{Nf} , respectivamente.
- $\ddot{\mathcal{E}}$ - Representa uma das energias $\ddot{\mathcal{E}}_{i_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_B}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_C}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_N}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_B}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_C}$ ou $\ddot{\mathcal{E}}_{v_N}$.
- $\ddot{\mathcal{E}}_{i_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_B}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_C}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{i_N}$ - Energia janelada dos coeficientes de aproximação, da primeira escala, de i_A, i_B, i_C e i_N , respectivamente.
- $\ddot{\mathcal{E}}_{v_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_B}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_C}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{v_N}$ - Energia janelada dos coeficientes de aproximação, da primeira escala, de v_A, v_B, v_C e v_N , respectivamente.
- $E_{i_A}, E_{i_B}, E_{i_C}$ e E_{i_N} - Energia média em um ciclo de $\mathcal{E}_{i_A}, \mathcal{E}_{i_B}, \mathcal{E}_{i_C}$ e \mathcal{E}_{i_N} , respectivamente.
- $E_{v_A}, E_{v_B}, E_{v_C}$ e E_{v_N} - Energia média em um ciclo de $\mathcal{E}_{v_A}, \mathcal{E}_{v_B}, \mathcal{E}_{v_C}$ e \mathcal{E}_{v_N} , respectivamente.
- $\ddot{E}_{i_A}, \ddot{E}_{i_B}, \ddot{E}_{i_C}$ e \ddot{E}_{i_N} - Energia média em um ciclo de $\ddot{\mathcal{E}}_{i_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_B}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_C}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{i_N}$, respectivamente.
- $\ddot{E}_{v_A}, \ddot{E}_{v_B}, \ddot{E}_{v_C}$ e \ddot{E}_{v_N} - Energia média em um ciclo de $\ddot{\mathcal{E}}_{v_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_B}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_C}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{v_N}$, respectivamente.
- Δk - Número de amostras equivalente a um ciclo na frequência fundamental.
- $\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_{AB}, \delta_{BC}$ e δ_{CA} - Ângulo de fase das tensões $v_{Af}, v_{Bf}, v_{Cf}, v_{ABf}, v_{BCf}$ e v_{CAf} , respectivamente, no instante da falta.
- δ_E - ângulo que apresenta valor típico igual a $\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_{AB}, \delta_{BC}$ ou δ_{CA} , conforme o tipo de falta.
- E_0 - Parâmetro da equação de energia dos coeficientes *wavelet* em função do ângulo de incidência de falta.
- E_1 - Parâmetro da equação de energia dos coeficientes *wavelet* em função do ângulo de incidência de falta.
- E_A - Indica que a falta envolve a fase A.
- E_B - Indica que a falta envolve a fase B.
- E_C - Indica que a falta envolve a fase C.
- E_{dist} - Indica a ocorrência de um distúrbio transitório.
- E_N - Indica que a falta envolve a terra.
- E_{pre} - Indica se as energias dos coeficientes *wavelet* encontravam-se em regime permanente, antes da ocorrência de um distúrbio.

E_{pos}	- Indica se as energias dos coeficientes <i>wavelet</i> encontravam-se em regime permanente, após ocorrência de um distúrbio.
E_{PTI}	- Indica se um período transitório foi detectado nas energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} ou \mathcal{E}_{i_C} .
E_{PTV}	- Indica se um período transitório foi detectado nas energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} ou \mathcal{E}_{v_C} .
E_{sag}	- Indica que o distúrbio apresenta um afundamento de tensão.
E_{TM}	- Indica que um distúrbio já foi detectado.
f	- Frequência fundamental.
f_s	- Taxa de amostragem.
g	- Coeficientes do filtro escala da transformada <i>wavelet</i> discreta.
\tilde{g}	- Coeficientes do filtro escala da transformada <i>wavelet</i> discreta redundante.
h	- Coeficientes do filtro <i>wavelet</i> da transformada <i>wavelet</i> discreta.
\tilde{h}	- Coeficientes do filtro <i>wavelet</i> da transformada <i>wavelet</i> discreta redundante.
$i_A, i_B, i_C, i_N,$	- Correntes de fase e de neutro, no local de monitoramento.
i_{Af}, i_{Bf}, i_{Cf} e i_{Nf}	- Correntes de fase e de neutro, no local de falta.
j	- j -ésima escala.
J_{max}	- Número máximo de decomposições (escalas) de um sinal.
k_{detec}	- Amostra relacionada ao tempo de detecção.
k_i	- Amostra relacionada ao período transitório i , identificada nas tensões e correntes de fase.
k_{iE}	- Amostra relacionada ao período transitório i , obtida por meio das curvas de energia.
k_{mE}	- Amostra relacionada ao primeiro período transitório de um distúrbio.
k_{nE}	- Amostra relacionada ao último período transitório de um distúrbio.
k_t	- Número de amostras de um sinal no domínio do tempo.

L	- Número de amostras dos filtros escala e <i>wavelet</i> .
μ	- Valor médio.
N_{PT}	- Número de períodos transitórios em um distúrbio.
σ	- Desvio padrão.
N	- Coordenada de falta referente à corrente de neutro.
r_f	- Resistência de falta.
θ_f	- Ângulo de incidência de falta.
$\theta_{i_{Af}}, \theta_{i_{Bf}}, \theta_{i_{Cf}}$ e $\theta_{i_{Nf}}$	- Ângulo de fase de i_{Af} , i_{Bf} , i_{Cf} e i_{Nf} , respectivamente, no instante de falta.
$\theta_{v_{Af}}, \theta_{v_{Bf}}, \theta_{v_{Cf}}$ e $\theta_{v_{Nf}}$	- Ângulo de fase de v_{Af} , v_{Bf} , v_{Cf} e v_{Nf} , respectivamente, no instante de falta.
t_w	- Tempo para o cálculo de um coeficiente <i>wavelet</i> .
τ	- Tempo de trânsito das ondas viajantes.
$u(\cdot)$	- Função degrau.
v_A, v_B, v_C e v_N	- Tensões de fase e de neutro, no local de monitoramento.
v_{Af}, v_{Bf}, v_{Cf} e v_{Nf}	- Tensões de fase e de neutro, no local de falta.
v_{AB}, v_{BC} e v_{CA}	- Tensões de linha, no local de monitoramento.
v_{ABf}, v_{BCf} e v_{CAf}	- Tensões de linha, no local de falta.
x	- Sinal teste usado para ilustrar algumas propriedades dos coeficientes <i>wavelet</i> , energias dos coeficientes <i>wavelet</i> , etc.

1.1 RELEVÂNCIA DA TESE

Os sistemas de energia elétrica estão constantemente sujeitos às condições ambientais adversas e falhas em equipamentos que dão origem às ocorrências e perturbações. No novo modelo do setor elétrico brasileiro, definido pela Lei 10.848/2004, a análise das ocorrências e perturbações está diretamente relacionada com os aspectos de segurança do sistema interligado nacional (SIN), sendo de responsabilidade dos agentes de operação e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para atendimento à Resolução Normativa Aneel n. 115, de 29 de novembro de 2004.

Atividades concernentes à análise de ocorrências e perturbações fornecem subsídios imprescindíveis para a identificação de suas causas e consequências, para a avaliação e especificação dos equipamentos de proteção, tais como relés e disjuntores, para proteção de pessoas, para o diagnóstico dos distúrbios, entre outros. Desta forma, medidas corretivas e preventivas podem ser impostas ou recomendadas, resultando em melhorias do desempenho do sistema elétrico e da qualidade dos serviços públicos de energia elétrica. Em casos como o do colapso de energia elétrica ocorrido no Brasil, em novembro de 2009, a análise dos dados elétricos das perturbações constitui-se uma etapa importante, visto que estas informações subsidiam o ONS e as empresas de transmissão de energia elétrica no sentido de minimizar a ocorrência de novos colapsos de energia elétrica.

Para que tais operações possam ser realizadas com rapidez e segurança é necessário se dispor do máximo de informações sobre as ocorrências. Atualmente, os equipamentos designados para esse fim são denominados registradores digitais de perturbações (RDPs). De modo geral, os RDPs monitoram constantemente grandezas elétricas em linhas de transmissão (LTs), linhas de distribuição e em equipamentos elétricos, tais como transformadores de potência, bancos de capacitores e compensadores estáticos, armazenando as informações em registros oscilográficos.

Os RDPs são programados para capturarem registros oscilográficos referentes às faltas e alguns distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE), tais como afundamentos de tensão e transitórios devido às manobras de chaveamento (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006), denominados distúrbios transitórios nesta tese. Entretanto, muitas vezes os registros oscilográficos não contêm informação de relevância à análise das perturbações. Esse fato aliado ao aumento crescente do uso de RDPs e à incapacidade desses dispositivos de discriminarem automaticamente os distúrbios têm provocado problemas de caráter operacional às empresas, tais como aumento no armazenamento e tráfego de informações na rede de oscilografia, além de sobrecargas na análise manual dos registros oscilográficos (SILVA *et al.*, 2007).

Diante do exposto, conclui-se que os RDPs são equipamentos imprescindíveis no auxílio à busca constante da melhoria do desempenho do sistema elétrico. Sendo assim, a pesquisa de novos algoritmos de diagnóstico de distúrbios, no que concerne a uma captura segura e confiável de distúrbios transitórios pelos RDPs e relés de proteção, constitui-se uma pesquisa atual e importante para o setor elétrico.

1.2 MOTIVAÇÃO

Além da necessidade real de busca de novos algoritmos de diagnóstico de distúrbios, outros fatores motivaram a pesquisa realizada nesta tese:

1. A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) possui um RTDSTM (*Real-Time Digital Simulator*). Esse equipamento é uma poderosa ferramenta de simulação em tempo real, com capacidade de modelar sistemas elétricos de potência de forma realista. O RTDSTM utiliza os mesmos algoritmos e equações encontrados em programas do tipo EMTP (*Electromagnetic transient program*). A simulação, entretanto, é considerada em tempo real, visto que as soluções do sistema elétrico são obtidas em um intervalo de tempo muito menor que as constantes de tempo do sistema (KUFFEL *et al.*, 1995). O RTDSTM apresenta ainda, uma interface para entrada e saída de dados analógicos e digitais do sistema elétrico simulado, tais como sinais de tensão, corrente e atuações (*trips*) de relés, sendo ideal para testes de equipamentos de monitoramento e controle do sistema. O uso de simuladores dessa natureza pode influenciar, de forma decisiva, a comunidade científica e a indústria na utilização prática da pesquisa.

2. A tese se enquadra em uma linha de pesquisa denominada Diagnóstico de Distúrbios em Sistemas de Potência, que vem sendo desenvolvida desde 2002 pelo Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da UFCG, estando vinculada aos seguintes projetos de pesquisa:

- (a) *Desenvolvimento de um Sistema de Diagnóstico de Distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência (SDSE)*. Projeto em andamento, financiado pela Fapesq (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba).
- (b) *Sistema de Detecção e Localização de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição*. Projeto em andamento, financiado pela Energisa.
- (c) *Classificação de Distúrbios no Sistema Elétrico Baseada nas Wave-nets* (SOUZA *et al.*, 2006). Projeto concluído, financiado pela Chesf (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco).

1.3 OBJETIVOS DA TESE

O objetivo geral da tese de doutorado é desenvolver um método de diagnóstico automático de distúrbios em sistemas de potência baseado na análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes, para controlar o disparo de RDPs, de maneira que apenas registros oscilográficos com distúrbios transitórios sejam gerados.

Os objetivos específicos do método de diagnóstico de distúrbios transitórios são:

1. Detectar, em tempo real, os transitórios decorrentes de faltas, de manobras de chaveamento e de alguns distúrbios de QEE, tais como afundamentos de tensão, identificando cada ocorrência. Múltiplos distúrbios transitórios que ocorrem em um curto intervalo de tempo, a exemplo de uma falta seguida por um religamento automático de uma LT também serão detectados, podendo ser armazenados em um único registro oscilográfico. As faltas evolutivas também serão detectadas pelo algoritmo proposto.
2. Identificar, em tempo real, os instantes inicial e final dos distúrbios. No caso de faltas evolutivas, os instantes em que a falta muda de tipo também serão identificados em tempo real.
3. Classificar, em tempo real, as faltas e as faltas evolutivas.

Com relação à transformada *wavelet* (TW), também são objetivos específicos da tese:

1. Verificar o comportamento da energia dos transitórios, em distúrbios como faltas, por meio da análise da energia dos coeficientes *wavelet*.
2. Avaliar se a energia dos coeficientes *wavelet* (energia dos transitórios) são apropriadas, ou não, à análise em tempo real de distúrbios transitórios.
3. Identificar qual das ferramentas, a transformada *wavelet* discreta (TWD) ou a transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR) é mais adequada ao diagnóstico, em tempo real, dos distúrbios transitórios.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição da tese é propor um novo método de diagnóstico de distúrbios, baseado na análise em tempo real das energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes, com as seguintes características:

1. Generalização no diagnóstico de distúrbios, abrangendo sistemas de transmissão de diversas topologias, níveis de tensão e taxas de amostragem.
2. Detecção dos principais distúrbios transitórios em sistemas de transmissão, tais como: faltas, afundamentos de tensão e transitórios devido às energizações e desligamentos de LTs e de banco de capacitores.
3. Detecção de múltiplos distúrbios transitórios.
4. Generalização na classificação de faltas, abrangendo faltas simples e evolutivas.

A implementação e avaliação do método de diagnóstico em um simulador em tempo real, assim como a avaliação do seu desempenho frente a registros oscilográficos reais com distúrbios, provenientes da Chesf, confirma a viabilidade da utilização da metodologia proposta em aplicações práticas.

No que diz respeito à divulgação dos resultados preliminares da tese, apresentam-se nas Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 as publicações em periódicos e anais de congressos.

Tabela 1.1. Artigos publicados em periódicos.

Periódico	Título	Autores
IEEJ Trans. on Power and Energy v. 130, n. 10, Outubro de 2010	Detection and Classification of Transient Disturbances in Power Systems	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
IET Electronics Letters. v. 46, n. 11, p. 753 - 755, 27 de Maio de 2010	Real-Time Detection of the Fault-Induced Transients in Transmission Lines	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
Revista Controle e Automação. v. 21, n. 2, p. 173 - 184, Março/Abril de 2010	Detecção de Falhas Evolutivas e Múltiplos Distúrbios em Registros Oscilográficos Baseada na Transformada <i>Wavelet</i> Discreta	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
Revista IEEE América Latina. v. 8, n. 1, p. 45 - 50, Março de 2010	Evolution of Oscillograph - How Did Chesf Transform Data Into Information?	B. A. Souza, N. S. D. Brito, F. B. Costa, J. J. A. L. Leitão, S. G. A. Cauponi, S. S. B. Silva
Revista Controle e Automação. v. 18, n. 2, p. 163 - 172, Maio de 2007	Detecção e classificação de faltas a partir da análise de registros oscilográficos via redes neurais artificiais e transformada <i>wavelet</i>	K. M. Silva, B. A. Souza, N. S. D. Brito, K. M. C. Dantas, F. B. Costa, S. S. B. Silva

Tabela 1.2. Artigos publicados em anais de eventos internacionais.

Evento	Título	Autores
CMD - International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Tokyo/Japão, Setembro de 2010	Fault Parameter Effects on the Energies of the Fault-Induced Transients	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
CMD - International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Tokyo/Japão, Setembro de 2010	A Wavelet-Based Method for Real-Time Transient Disturbance Detection	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
IPST - International Conference on Power Systems Transients. Kyoto/Japão, Junho de 2009	A Wavelet-Based Method for Detection and Classification of Single and Crosscountry Faults in Transmission Lines	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
ISH - International Symposium on High Voltage Engineering. Cidade do Cabo/Africa do Sul, Julho de 2009	Discrete Wavelet Transform in Power Systems: Transient Disturbance Analysis	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
IEEE PES GM - General Meeting. Pittsburgh/Estados Unidos, Julho de 2008	A Wavelet-Based Algorithm to Analyze Oscillographic Data with Single and Multiple Disturbances	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
IPST - International Conference on Power Systems Transients. Lyon/França, Junho de 2007	A Wavelet-Based Algorithm for Disturbances Detection Using Oscillographic Data	F. B. Costa, K. M. Silva, K. M. C. Dantas, B. A. Souza, N. S. D. Brito
ICHQP - International Conference on Harmonics and Quality of Power. Quascais/Portugal, Outubro de 2006	A Wavelet-Based Algorithm for Fault Classification Using Oscillographic Data	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito, K. M. Silva, K. M. C. Dantas

Tabela 1.3. Artigos publicados em anais de eventos nacionais.

Evento	Título	Autores
SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belém - PA, Maio de 2010	Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnóstico de Distúrbios	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito, K. M. Silva
SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belém - PA, Maio de 2010	Automação na Análise de Ocorrências: a Contribuição da Chesf para o Desenvolvimento de Novas Técnicas	N. S. D. Brito, B. A. Souza, F. B. Costa
CBQEE - Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica. Blumenau - SC, Agosto de 2009	Fault Resistance, Location and Inception Angle Effects on DC Offset of the Fault Currents	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito, W. C. Santos
CBQEE - Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica. Blumenau - SC, Agosto de 2009	Analysis of Faults and Voltage Sags Due to Faults in Electrical Power Systems	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
CBA - Congresso Brasileiro de Automática. Juiz de Fora - MG, Setembro de 2008	Detection and Classification of Power Quality Disturbances by Wavelet Transform	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belo Horizonte - MG, Abriu de 2008	An ANN-Based Algorithm to Classify Power System Events	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito
CBQEE - Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica. Santos - SP, Agosto de 2007	<i>Labwave</i> : Um Software para Análise de Registros Oscilográficos	F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A tese está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

1. No Capítulo 2 é apresentado o levantamento do estado da arte dos algoritmos de diagnóstico de distúrbios.
2. No Capítulo 3 é abordada a fundamentação teórica da transformada *wavelet*, mostrando algumas vantagens e desvantagens da TWD e da TWDR na análise de distúrbios transitórios. O cálculo em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet* também é proposto neste capítulo.
3. No Capítulo 4 são apresentadas as principais características de alguns distúrbios transitórios, além do comportamento da energia dos coeficientes *wavelet* direcionado ao diagnóstico dos distúrbios. Propõe-se também a técnica para detecção e classificação de distúrbios transitórios.

4. No Capítulo 5 é verificado o comportamento da energia dos transitórios de falta, por meio da energia dos coeficientes *wavelet*, em função dos parâmetros de falta. Propõe-se também a técnica para classificação de faltas.
5. No Capítulo 6 são apresentadas as características básicas do simulador em tempo real utilizado na tese (RTDSTM), mostrando detalhes da implementação em tempo real do método de diagnóstico de distúrbios proposto, assim como detalhes dos sistemas elétricos utilizados para avaliação do método.
6. No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos com o método de diagnóstico de distúrbios, em tempo real. Os resultados obtidos com a versão *off-line* do método na análise de distúrbios em registros oscilográficos reais também são apresentados.
7. As considerações finais e as diretrizes para a continuação da pesquisa são feitas no Capítulo 8.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) é uma ferramenta matemática que fornece informações das frequências de um sinal, entretanto, informações sobre o domínio do tempo são perdidas. Por este motivo, a TDF se aplica bem à análise de sinais, cujas componentes de frequência não variam com o tempo. A versão com janela da TDF, denominada Transformada Rápida de Fourier (TRF), supera algumas deficiências da TDF ao prover informações de tempo e frequência, sendo apropriada à análise de harmônicas em alguns distúrbios de QEE (GU; BOLLEN, 2000). A largura da janela da TRF determina as resoluções no tempo e em frequência. Porém, quando a largura da janela é escolhida para se ter uma boa resolução no tempo, a resolução na frequência se torna deteriorada, ou vice versa.

A TWD supera algumas das dificuldades da TRF pela análise multiresolução (AM), que permite a análise de um determinado sinal em diferentes níveis de resolução de tempo e de frequência, tornando-se apropriada à detecção e localização de transitórios constituídos de componentes de baixa e alta frequência, situação comum em sinais com faltas e alguns distúrbios de QEE em sistemas elétricos de potência (WIKINSON; COX, 1996; HEYDT; GALLI, 1997). Por outro lado, o cálculo da TWD é computacionalmente mais rápido que o cálculo da TRF (PERCIVAL; WALDEN, 2000), característica importante em aplicações em tempo real.

Apresenta-se a seguir um levantamento do estado da arte dos métodos de diagnóstico de distúrbios em sistemas elétricos de potência, dando-se ênfase aos métodos que utilizam a TWD para detectar e classificar faltas e distúrbios de QEE compostos por transitórios, tais como afundamentos de tensão e transitórios de chaveamento.

2.1 DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

2.1.1 Métodos Baseados na Transformada *Wavelet*

Ribeiro (1994) é considerado o pioneiro a utilizar as *wavelets* em sistemas de potência. Na mesma época, Santos *et al.* (1994) propuseram uma nova abordagem para detectar e localizar alguns distúrbios relacionados à QEE, dando ênfase aos distúrbios com transitórios rápidos e lentos. O primeiro distúrbio apresenta variações rápidas e abruptas de curta duração, sendo apropriada a utilização das *wavelets* Daubechies 4 ou 6 (db4 ou db6)¹. O segundo apresenta mudanças suaves nas formas de onda, sendo as *wavelets* db8 e 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. Santos *et al.* (1996) apresentaram as características da AM da TW, aplicando-as ao diagnóstico de distúrbios. Vários tipos de distúrbios de QEE foram analisados utilizando-se a técnica de detecção proposta por Santos *et al.* (1994).

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 os picos com valores pré-definidos da parte do sinal em regime permanente. A distinção dos distúrbios foi baseada na duração e no número de picos excedendo um certo limiar. Dados adicionais, tais como amplitude, duração e forma de onda das tensões em várias frequências também foram utilizados na classificação dos distúrbios em afundamentos de tensão ou transitórios de chaveamento. O desempenho do método foi avaliado com mais de 1500 registros reais obtidos de um sistema elétrico com sinais amostrados a 4000, 6400 ou 10000 amostras/s. 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 detectados corretamente. 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

¹As *wavelets* mães Daubechies 4, 6, 8, etc. são representadas nesta tese da forma db4, db6, db8, etc.

tiveram diagnóstico correto. A metodologia delineada por Poisson *et al.* (1998) se destaca pela utilização de dados reais com diversas taxas de amostragem. No entanto, a TWC é uma técnica redundante e requer um tempo de processamento superior a TWD (PERCIVAL; WALDEN, 2000).

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 em várias escalas, em que constatou-se a primeira escala mais apropriada à detecção dos transitórios relacionados aos instantes inicial e final dos distúrbios. Várias *wavelets* mãe foram avaliadas, das quais selecionou-se a db6. Os autores constataram que os coeficientes *wavelet* da primeira escala referentes ao regime permanente, calculadas com a db6, possuem distribuição de probabilidade normal. Os coeficientes *wavelet* referentes aos ruídos de natureza elétrica do regime permanente foram eliminados com o uso de um limiar adaptativo, com valor em função da média e desvio padrão dos coeficientes, preservando-se apenas os coeficientes relacionados aos transitórios. Desta forma, identificaram-se os instantes inicial e final dos afundamentos de tensão. Apenas dados simulados foram avaliados. No entanto, os resultados foram comparados com um método tradicional, que emprega a definição de afundamento de tensão baseado no valor RMS dos sinais de tensão. Gencer *et al.* (2010) também utilizaram a TWD para detecção dos instantes inicial e final dos afundamentos de tensão. Porém, o método foi avaliado em tempo real, utilizando a *wavelet* db4.

Gaouda *et al.* (2002) apresentaram vários exemplos de aplicação da TWD à análise de distúrbios de QEE, dando-se ênfase à detecção e localização dos instantes inicial e final de transitórios devidos ao chaveamento de banco de capacitores, realizadas com os coeficientes *wavelet* da primeira escala, após eliminação dos coeficientes relacionados aos ruídos elétricos. Os autores também mostraram que é possível detectar e classificar afundamentos de tensão, elevações de tensão e distorções harmônicas fazendo uso da energia concentrada dos coeficientes *wavelet* de várias escalas. Probert & Song (2002) também apresentaram exemplos de aplicação da TWD à detecção e classificação de distúrbios transitórios. No entanto, foram utilizados sinais com uma alta taxa de amostragem, sendo a detecção e a localização dos transitórios demonstrados fazendo uso dos coeficientes *wavelet* das quatro primeiras escalas das correntes. Exemplos de classificação de distúrbios foram ilustrados com o uso das energias concentradas dos coeficientes *wavelet* das correntes. As energias concentradas calculadas nas 15 primeiras

escalas foram comparadas. Desta forma, um aumento de energia em uma determinada escala foi correlacionada a um determinado distúrbio. Uma limitação dos métodos baseados na análise da energia concentrada dos coeficientes *wavelet* em várias escalas é que o conteúdo de frequência dos transitórios em diversos distúrbios pode está contido em um mesmo espectro de frequência e o aumento da energia concentrada em uma determinada escala pode está associada aos diferentes distúrbios transitórios. Além disto, sinais reais podem conter múltiplos distúrbios em instantes distintos, comprometendo a análise da energia concentrada dos coeficientes *wavelet*. Outra limitação prática dessas metodologias é a utilização de vários estágios da TWD para cálculo dos coeficientes *wavelet* e das respectivas energias, o que requer tempo de processamento elevado se comparada às outras metodologias de análise de distúrbios baseadas nos coeficientes *wavelets* da primeira escala.

Como alternativa ao uso das energias concentradas dos coeficientes *wavelet* em diversas escalas, Costa *et al.* (2007) e Costa *et al.* (2008b) utilizaram a energia janelada dos coeficientes *wavelet*, da primeira escala, das tensões e correntes para detecção e classificação de distúrbios de QEE e de faltas. A metodologia proposta foi avaliada com registros oscilográficos simulados e reais. Com a utilização das energias janeladas dos coeficientes *wavelet* é possível detectar os distúrbios e identificar os transitórios relacionados aos instantes inicial e final de faltas e afundamentos de tensão, além da detecção e classificação de múltiplos distúrbios em registros oscilográficos (COSTA *et al.*, 2008c; COSTA *et al.*, 2009a; COSTA *et al.*, 2009b).

Wikinson & Cox (1996), Robertson *et al.* (1996), Lee *et al.* (1997), Poisson *et al.* (1998), Costa *et al.* (2006a), Santos (2008) também apresentaram exemplos de aplicação ou métodos de diagnóstico de distúrbios de QEE baseados nas *wavelets*.

Dentre as diversas *wavelets*, a família das *wavelets* Daubechies vem se destacando em métodos de diagnóstico de distúrbios em sistemas de potência (BRITO *et al.*, 1998), em especial, a *wavelet* db4 (KIM; AGGARWAL, 2001).

2.1.2 Métodos Híbridos

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são ferramentas matemáticas que visam emular o raciocínio do especialista com algoritmos computacionais velozes e robustos. Dentre as principais

aplicações das RNAs, destaca-se o reconhecimento de padrões que, combinado com outras técnicas de inteligência artificial e de processamento digital de sinais, é uma alternativa aos métodos tradicionais de classificação de faltas e de distúrbios de QEE. (BORRÁS *et al.*, 2001; OLESKOVICZ *et al.*, 2006; COSTA *et al.*, 2008a; PANIGRAHI; PANDI, 2009).

Chuang *et al.* (2005a), Chuang *et al.* (2005b) propuseram um método híbrido de detecção e classificação de distúrbios de QEE, baseado no valor RMS (*roots means square*) das tensões, na TW e nas RNAs. O método é capaz de detectar e classificar múltiplos distúrbios de QEE em um único registro, listados a seguir: afundamentos, elevações e interrupções de tensão, transitórios impulsivos, distorções harmônicas e *flickers*. Inicialmente, os valores eficazes das tensões e correntes são calculados e os respectivos sinais em regime permanente são estimados. As tensões originais são comparadas com as tensões estimadas, ciclo a ciclo, até a identificação de um afundamento, elevação ou interrupção de tensão. Em seguida, sinais modificados, resultantes de operações de subtração dos respectivos sinais originais com os sinais estimados são obtidos. Esses sinais são constituídos de ruídos e transitórios. Aplica-se quatro estágios da TWD aos sinais modificados, em que os desvios padrões dos coeficientes *wavelet*, da primeira escala, dos sinais modificados são comparados com limiares para a detecção dos transitórios impulsivos. Se transitórios impulsivos são detectados, os sinais modificados são filtrados, eliminando os transitórios e mais quatro estágios da TWD são novamente aplicados aos sinais modificados. Por fim, os desvios padrões dos coeficientes *wavelet* das quatro escalas e dos coeficientes de aproximação da última escala dos sinais modificados são calculados e apresentados à RNA para a detecção das distorções harmônicas e *flickers*. A *wavelet* mãe db8 foi utilizada em conjunto com a rede neural de estrutura dinâmica (*Dynamic Structure Neural Network*). A RNA foi treinada com 750 registros simulados e uma taxa de acerto de 98,9% na etapa de treinamento foi obtida, com 86 neurônios. O método foi avaliado com 2250 registros simulados e uma taxa de acerto de aproximadamente 98% foi obtida. O método identifica um, ou a combinação dos distúrbios listados. No entanto, como as faltas não foram avaliadas, o método pode apresentar limitações em aplicações reais.

2.2 DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

2.2.1 Métodos Baseados na Transformada *Wavelet*

Mo & Kinsner (1997) apresentaram a TWD como uma ferramenta poderosa à detecção de faltas e de distúrbios transitórios em sistemas de potência. Dois exemplos de caso foram ilustrados, um referente a uma falta e outro referente a uma operação de chaveamento de um banco de capacitores, em que cada sinal foi decomposto até a quinta escala *wavelet*. As principais características dos coeficientes *wavelet* em cada escala foram abordadas, demonstrando que as primeiras escalas são apropriadas à detecção e localização no tempo dos transitórios. As demais escalas, no entanto, podem ser utilizadas para identificação dos distúrbios. Os autores sugeriram a utilização das *wavelets* em algoritmos de detecção automática de transitórios em registradores de perturbações, mostrando as possíveis vantagens frente aos registradores tradicionais. No entanto, nenhuma metodologia foi apresentada. Além disto, a utilização das RNAs em conjunto com as *wavelet* aplicadas à classificação dos transitórios também foi sugerida.

Kim & Aggarwal (2001) propuseram um algoritmo para detecção de faltas baseado nos coeficientes *wavelet*, da primeira escala, das correntes 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 afirmaram que esse módulo pode ser estendido para identificação das correntes das fases envolvidas com a falta, uma vez que nessas correntes o somatório dos coeficientes *wavelet* em uma janela específica ultrapassa um determinado limiar. Os autores discutem a possibilidade de detecção de distúrbios de QEE utilizando a TW. Foram indicadas as *wavelets* mãe db4 e db6 (DAUBECHIES, 1992) como sendo as mais apropriadas na aplicação delineada.

Chanda *et al.* (2004) propuseram um algoritmo baseado na TWD para detecção e classificação de faltas em LTs. As regras foram estabelecidas comparando os valores máximos dos coeficientes *wavelet* de detalhe das correntes. O método baseia-se na análise das componentes de baixa frequência, na ordem da segunda e terceira harmônica (100 e 150 Hz para a frequência fundamental de 50 Hz), predominantes nas correntes de falta. Portanto, na aplicação em questão, a sexta escala *wavelet* é a mais adequada para a análise das faltas, visto que o espectro de frequência varia de 97 a 195 Hz para a taxa de amostragem de 12500 amostras/s utilizada.

No entanto, em aplicações em tempo real, cujo tempo de processamento é um parâmetro primordial, a utilização de sucessivos estágios da TWD caracteriza-se como uma desvantagem se comparado aos algoritmos que utilizam os coeficientes *wavelet* da primeira escala, a exemplo dos métodos propostos por Liang *et al.* (1998) e Youssef (2001). O algoritmo proposto depende de alguns limiares estabelecidos nos coeficientes *wavelet* das correntes, sendo as correntes de fase normalizadas para eliminação do efeito do nível das correntes. Os autores afirmaram que o método independe dos efeitos da resistência, do ângulo de inserção e da localização da falta. O algoritmo foi avaliado para faltas e transitórios de chaveamento simulados em um programa do tipo EMTP, considerando um modelo simples, composto por uma única LT. Bons resultados foram obtidos com o algoritmo. No entanto, outros distúrbios, a exemplo de afundamentos de tensão, poderiam ter sido utilizados para uma melhor avaliação do método de detecção de faltas. A *wavelet* mãe utilizada foi a db8.

Costa (2006) propôs um método baseado na TWD para detecção, delimitação da duração e classificação de faltas em LTs. A detecção da falta foi realizada por um conjunto de regras, construído a partir da análise da energia janelada dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase, da primeira escala. As regras para determinar a duração da falta foram baseadas na análise dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase e de neutro. A classificação da falta foi realizada com a análise da energia concentrada dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase e neutro, durante o instante de falta. A principal desvantagem do método é a utilização de mais de uma escala *wavelet*, visto que as etapas de delimitação da duração e classificação da falta utilizam os coeficientes *wavelet* da escala que contempla a quinta harmônica. O método foi avaliado com registros simulados e com registros reais capturados por RDPs em diversas LTs do sistema de transmissão da Chesf.

Costa *et al.* (2005), Costa *et al.* (2006c) propuseram métodos para identificação dos instantes inicial e final de faltas em registros oscilográficos. No entanto, em uma falta evolutiva, os respectivos métodos não identificam o instante em que a falta muda de tipo. Costa *et al.* (2009b), Costa *et al.* (2009a) apresentaram exemplos de aplicação das *wavelets* à identificação dos instantes inicial e final de faltas em registros oscilográficos com faltas simples e evolutivas, enquanto Costa *et al.* (2009c) apresentaram um método baseado na energia janelada dos coeficientes *wavelet* para classificação de faltas simples e evolutivas.

Outros métodos baseados na utilização das *wavelets* para detecção, classificação e/ou identificação dos instantes de falta têm sido propostos, dentre os quais destacam-se: Solanki *et al.* (2001), Probert & Song (2002), Solanki & Song (2003), Jiang *et al.* (2003), Costa *et al.* (2006), Costa *et al.* (2006), Elkalashy *et al.* (2009).

2.2.2 Métodos Baseados em Redes Neurais Artificiais

Kezunovic & Rikalo (1996) utilizaram uma RNA para classificação de faltas. Os sinais utilizados para geração da base de dados da etapa de treinamento da RNA foram apenas os sinais de corrente de fase, simulados em um programa do tipo EMTP. A taxa de amostragem utilizada foi de 2000 amostras/s. Os padrões de entrada da rede foram organizados na forma de uma janela de amostras referentes a um ciclo da frequência fundamental de 60 Hz. Essa metodologia apresentou uma taxa de acerto de 95,93% para os padrões de teste.

Outros métodos baseados na utilização das RNAs para o diagnóstico de faltas têm sido propostos, sempre na tentativa de melhorar o desempenho de algoritmos já existentes (BO *et al.*, 1997; SONG *et al.*, 1997; ZAHRA *et al.*, 2000; KEZUNOVIC *et al.*, 2002; MAHANTY; GUPTA, 2004).

2.2.3 Métodos Híbridos

Nos últimos anos, a combinação de mais de uma técnica vem sendo proposta em algoritmos de detecção e classificação de faltas (FUKUYAMA; UEKI, 1993; MARTIN; AGUADO, 2003; YOUSSEF, 2004; PRADHAN *et al.*, 2004; COSTA *et al.*, 2006b; PERERA *et al.*, 2009).

Silva *et al.* (2006) propuseram um método para análise de faltas em LTs baseado na TWD em conjunto com as RNAs. O método utiliza a energia janelada dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase, da primeira escala, para detecção de faltas. Os instantes inicial e final do distúrbio são identificados pela análise dos coeficientes *wavelet* das correntes, também na primeira escala. O módulo de classificação de faltas baseia-se na utilização de uma RNA do tipo *perceptron* de múltiplas camadas, cujas entradas são as amostras de tensão e corrente após o instante inicial da falta. O algoritmo de treinamento utilizado foi o RPROP (*Resilient Propagation*). O método proposto foi avaliado com registros oscilográficos reais e simulados e bons resultados foram relatados. Além das faltas, registros com afundamentos de tensão e

transitórios ocasionados por manobras de chaveamento também foram utilizados na avaliação do método de detecção de faltas.

Salim *et al.* (2008) propuseram um método de diagnóstico de faltas em sistemas de distribuição. As etapas de detecção e classificação das faltas são realizadas por meio da análise das energias dos coeficientes *wavelet* das correntes, calculadas com a TWDR em uma escala que contempla a faixa de frequência de 750 a 1000 Hz. O instante de ocorrência da falta é identificado fazendo uso dos coeficientes *wavelet*. Em seguida, os fasores das tensões e correntes são utilizados para o cálculo das impedâncias e localização das faltas. As equações utilizadas para localizar as faltas mudam conforme o tipo da falta. Por fim, o ramo em que ocorreu a falta é identificado via RNA. O método foi avaliado com dados simulados no ATP (*Alternative Transient Program*) e bons resultados foram obtidos. Na prática, além das faltas, os sistemas de distribuição estão sujeitos às condições ambientais adversas e manobras de chaveamentos que resultam em diversos distúrbios, tais como afundamentos de tensão e transitórios de chaveamento. Os autores não levaram em consideração os demais distúrbios, sendo o método de detecção de faltas avaliado apenas com faltas. Com relação à localização das faltas, um total de 10 RNAs são utilizadas, uma para cada tipo de falta, para identificação do ramo com faltas.

2.3 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O resumo da revisão bibliográfica é apresentado na Tabela 2.1, destacando-se as principais publicações referentes à análise e métodos de diagnóstico de distúrbios de QEE em sistemas de potência baseados em técnicas não convencionais de diagnóstico. Os objetivos (detecção, identificação da duração e classificação) e as técnicas empregadas no diagnóstico são indicados na Tabela 2.1. Detalhes da implementação dos métodos, tais como o uso das tensões e/ou correntes e o uso de dados reais e/ou simulados também são destacados.

Tabela 2.1. Resumo da revisão bibliográfica referente à análise de distúrbios de QEE.

Referência	Objetivo			Técnica empregada	Sinais avaliados		Dados avaliados	
	Detec.	Dur.	Classific.		Tensão	Corrente	Real	Simulado
Santoso <i>et al.</i> (1994)	✓	✓	-	TWD	✓	-	-	✓
Santoso <i>et al.</i> (1996)	✓	✓	-	TWD	✓	-	-	✓
Wikinson & Cox (1996)	✓	✓	-	TWD	-	✓	-	✓
Robertson <i>et al.</i> (1996)	✓	✓	-	TWD	-	✓	✓	-
Lee <i>et al.</i> (1997)	✓	-	✓	TRF+TWD	✓	-	-	✓
Parsons <i>et al.</i> (1999)	-	✓	-	TWD	✓	-	-	✓
Poisson <i>et al.</i> (1998)	✓	✓	✓	TWC	✓	-	✓	-
Santoso (2000a)	✓	-	✓	TWD+RNA	✓	-	-	✓
Santoso (2000b)	✓	-	✓	TWD+RNA	✓	-	-	✓
Mao & Aggarwal (2001)	✓	-	-	TWD+RNA	-	✓	-	✓
Borrás <i>et al.</i> (2001)	✓	-	✓	TWD+RNA	✓	-	-	✓
Resende <i>et al.</i> (2001)	✓	✓	✓	TWD	✓	-	-	✓
SHAH BAKI <i>et al.</i> (2002)	✓	-	✓	TWD+ <i>Fuzzy</i>	✓	-	✓	-
Probert & Song (2002)	✓	-	✓	TWD	-	✓	-	✓
Gaouda <i>et al.</i> (2002)	✓	✓	✓	TWD	✓	-	-	✓
Chuang <i>et al.</i> (2005a)	✓	-	✓	TWD+RNA	✓	✓	-	✓
Chuang <i>et al.</i> (2005b)	✓	-	✓	TWD+RNA	✓	✓	-	✓
Oleskovicz <i>et al.</i> (2006)	✓	✓	✓	TWD+outros	✓	-	✓	✓
Costa <i>et al.</i> (2007)	✓	-	-	TWD	-	✓	✓	-
Costa <i>et al.</i> (2008b)	✓	-	✓	TWD	-	✓	✓	-
Costa <i>et al.</i> (2008a)	-	-	✓	TWD+RNA	✓	✓	✓	-
Costa <i>et al.</i> (2008c)	✓	-	✓	TWD	✓	✓	✓	-
Costa <i>et al.</i> (2009a)	✓	✓	✓	TWD	✓	✓	✓	-
Costa <i>et al.</i> (2009b)	✓	✓	✓	TWD	✓	✓	✓	-
Panigrahi & Pandi (2009)	✓	-	✓	TWD+ <i>Fuzzy</i>	✓	-	-	✓
Gencer <i>et al.</i> (2010)	✓	✓	-	TWD	✓	-	-	✓

Um resumo da revisão bibliográfica é apresentado na Tabela 2.2, destacando-se as principais publicações referentes à análise e métodos de diagnóstico de faltas em sistemas de potência baseados em técnicas não convencionais de diagnóstico.

Tabela 2.2. Resumo da revisão bibliográfica referente ao diagnóstico de falta.

Referência	Objetivo			Técnica empregada	Sinais avaliados		Dados avaliados	
	Detec.	Dur.	Classific.		Tensão	Corrente	Real	Simulado
Girsis (1982)	-	-	✓	Fasores	-	✓	-	✓
Fukuyama & Ueki (1993)	✓	-	✓	RNA	✓	✓	-	✓
Dausten & Kulieke (1995)	-	-	✓	RNA	✓	✓	-	✓
Kezunovic & Rikalo (1996)	✓	-	✓	RNA	-	✓	-	✓
Mo & Kinsner (1997)	✓	✓	✓	TWD+RNA	✓	✓	-	✓
Bo <i>et al.</i> (1997)	-	-	✓	RNA	✓	-	-	✓
Song <i>et al.</i> (1997)	-	-	✓	RNA	✓	✓	-	✓
Liang <i>et al.</i> (1998)	✓	-	✓	TWD	-	✓	-	✓
Silveira <i>et al.</i> (1999)	-	-	✓	TWD	✓	✓	-	✓
Zahra <i>et al.</i> (2000)	-	-	✓	RNA	✓	✓	-	✓
Youssef (2001)	-	-	✓	TWD	-	✓	-	✓
Kim & Aggarwal (2001)	✓	-	✓	TWD	-	✓	-	✓
Solanki <i>et al.</i> (2001)	✓	-	✓	TWD	-	✓	-	✓
Kim <i>et al.</i> (2002)	✓	-	-	TWD	-	✓	-	✓
Kezunovic <i>et al.</i> (2002)	-	-	✓	RNA	-	✓	-	✓
Solanki & Song (2003)	✓	✓	-	TWD	-	✓	-	✓
Jiang <i>et al.</i> (2003)	✓	-	✓	TWD	-	✓	-	✓
Martin & Aguado (2003)	✓	-	✓	TWD+RNA	✓	✓	-	✓
Mahanty & Gupta (2004)	✓	-	✓	RNA	-	✓	-	✓
Chanda <i>et al.</i> (2004)	✓	-	✓	TWD	-	✓	-	✓
Youssef (2004)	-	-	✓	TWD+ <i>Fuzzy</i>	-	✓	-	✓
Pradhan <i>et al.</i> (2004)	-	-	✓	TWD+ <i>Fuzzy</i>	-	✓	-	✓
Costa <i>et al.</i> (2005)	-	✓	-	TWD	-	✓	✓	✓
Costa (2006)	✓	✓	✓	TWD	-	✓	✓	✓
Costa <i>et al.</i> (2006)	-	-	✓	TWD	-	✓	✓	✓
Costa <i>et al.</i> (2006)	-	-	✓	TWD	-	✓	✓	✓
Costa <i>et al.</i> (2006b)	-	-	✓	TWD	-	✓	✓	✓
Costa <i>et al.</i> (2006c)	-	✓	-	TWD	-	✓	✓	✓
Salim <i>et al.</i> (2008)	✓	✓	✓	TW+outros	✓	✓	-	✓
Costa <i>et al.</i> (2009a)	✓	✓	✓	TWD	✓	✓	✓	-
Costa <i>et al.</i> (2009b)	✓	✓	✓	TWD	✓	✓	✓	-
Perera <i>et al.</i> (2009)	✓	-	✓	TWD+RNA	-	✓	-	✓
Costa <i>et al.</i> (2009c)	-	-	✓	TWD	✓	✓	✓	✓
Elkalashy <i>et al.</i> (2009)	✓	✓	-	TWD	✓	✓	-	✓

Na revisão bibliográfica identificaram-se deficiências que podem limitar a utilização de muitos métodos de diagnóstico em aplicações reais. Após avaliação do estado da arte, alguns requisitos básicos foram tomados como referência à elaboração do método de diagnóstico, proposto nesta tese, destacados a seguir:

- Um método de diagnóstico de distúrbios deve ser o mais genérico possível, ou seja, deve realizar com sucesso análise de dados provenientes de diversas topologias do sistema, com diferentes níveis de tensão e taxas de amostragem.
- Um método de diagnóstico de distúrbios transitórios deve prover a detecção e classificação dos principais distúrbios, no qual destacam-se as faltas, os afundamentos de tensão e os transitórios devido às manobras de chaveamento.
- Um método de diagnóstico de distúrbios deve prover a detecção de múltiplos distúrbios, tais como faltas seguidas por religamentos automáticos de LTs.
- Um método de diagnóstico de distúrbios deve prover a localização, no tempo, dos instantes dos distúrbios.
- No caso de curto-circuito, a classificação das faltas evolutivas também deve ser contemplada. Além disso, o desempenho do método de classificação de faltas deve ser avaliado frente aos diversos parâmetros, tais como resistência de falta, ângulo de incidência de falta, localização da falta e topologias do sistema.
- Um método de diagnóstico de distúrbios deve ser avaliado com dados reais e simulados. O uso apenas dos dados simulados pode resultar em limitações práticas, visto que a análise dos dados reais pode revelar alguns aspectos dos fenômenos transitórios, dificilmente encontrados em simulações digitais (PRICE; WARREN, 2003; ZIN; KARIM, 2007; COSTA *et al.*, 2009b).
- Um método de diagnóstico de distúrbios a ser utilizado em um dispositivo de monitoramento ou relé de proteção deve ser avaliado com simulações em tempo real.

FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA *WAVELET*

O diagrama de blocos simplificado do método de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios proposto nesta tese é apresentado na Figura 3.1. Os coeficientes *wavelet* e de aproximação da primeira escala das tensões e correntes são calculados, em tempo real, fazendo uso da TWD ou da TWDR, seguido pelo cálculo das energias janeladas desse coeficientes em uma janela de um ciclo. O diagnóstico dos distúrbios é feito por meio da análise, em tempo real, das energias, sendo basicamente dividido em duas etapas: detecção e classificação dos distúrbios e classificação das faltas, as quais são descritas nos Capítulos 4 e 5, respectivamente.

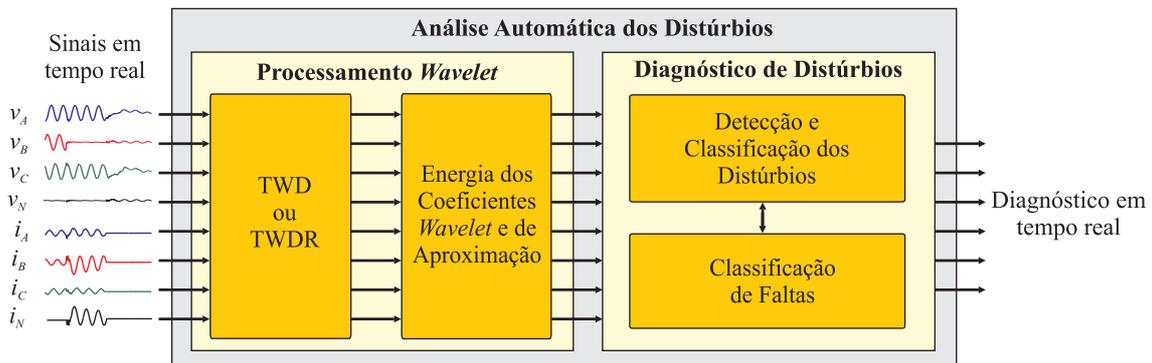


Figura 3.1. Análise em tempo real das amostras de tensão e corrente.

Para melhor compreensão do método de diagnóstico, em tempo real, dos distúrbios transitórios exposto nos próximos capítulos, é oportuno tecer algumas considerações pertinentes aos conceitos básicos da TWD e da TWDR neste capítulo. Exemplos de aplicação dos coeficientes *wavelet* e das respectivas energias para detecção e identificação dos transitórios, além da influência da taxa de amostragem na análise desses sinais, também são tratados neste capítulo.

3.1 ALGORITMO DE MALLAT PARA CÁLCULO DA TWD

O conceito básico das *wavelets* é derivado da transformada de Haar, proposta em 1910, porém, apenas na década de 80 as *wavelets* foram matematicamente formuladas. O marco decisivo na história das *wavelets* foi o trabalho de Grossman & Morlet (1984), no qual os autores propuseram a TWC. A partir dessa pesquisa, a comunidade científica iniciou o refinamento matemático da teoria das *wavelets*, com destaque às contribuições de Daubechies (1992), que iniciou o conceito da transformada *wavelet* discreta.

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

$$c_j(k) = \sum_n g(n - 2k)c_{j-1}(n), \quad (3.1)$$

$$d_j(k) = \sum_n h(n - 2k)c_{j-1}(n), \quad (3.2)$$

sendo c_j e d_j os coeficientes de aproximação e detalhes da escala j , respectivamente; $g(k)$ e $h(k)$ os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

As Equações 3.1 e 3.2, no contexto de processamento de sinais digitais, representam processos de filtragens digitais, seguidos por subamostragens por um fator de dois. Os coeficientes de aproximação c_j e os coeficientes de detalhes (coeficientes *wavelet*) d_j , da escala j , são obtidos respectivamente, pela convolução dos coeficientes de aproximação c_{j-1} , da escala $j-1$, com os filtros g e h , seguidos por uma subamostragem por dois. De acordo com essas equações, os coeficientes de aproximação e *wavelet*, da primeira escala, são:

$$c_1(k) = \sum_n g(n - 2k)c_0(n), \quad (3.3)$$

$$d_1(k) = \sum_n h(n - 2k)c_0(n), \quad (3.4)$$

sendo c_0 o sinal original.

Apresenta-se na Figura 3.2 o processo de decomposição de um sinal amostrado no tempo c_0 , a uma frequência de amostragem f_s , com a técnica de filtragem denominada *lifting* (DAUBECHIES, 1992). Utilizou-se apenas um estágio da TWD, conforme as Equações 3.3 e 3.4. Os blocos com o símbolo $\downarrow 2$ representam a operação de subamostragem por dois, enquanto os outros blocos representam a convolução de c_0 com o filtro g ou h .

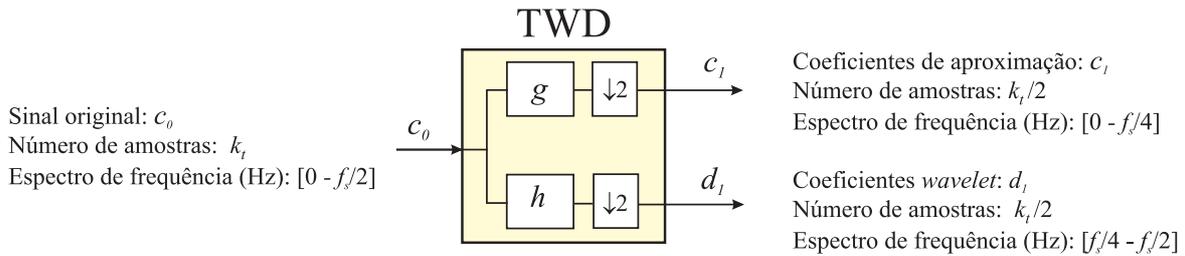


Figura 3.2. Bloco da TWD.

O sinal original c_0 (Figura 3.2) é decomposto nas componentes c_1 e d_1 , que são os coeficientes de aproximação e *wavelet* da primeira escala, respectivamente. Devido ao processo de subamostragem, o número de amostras desses coeficientes é metade do sinal original. A componente c_1 é a saída subamostrada do filtro passa-baixa g , que possui conteúdo de mais baixa frequência do sinal. Por outro lado, a componente d_1 é a saída subamostrada do filtro passa-alta h , retendo o conteúdo de mais alta frequência do sinal.

Como consequência do teorema da amostragem de Nyquist¹ (OPPENHEIM; SCHAFER, 1989), em que um sinal com frequência de amostragem f_s possui um espectro de frequência de 0 a $f_s/2$ Hz e do fato dos filtros digitais g e h constituírem-se em filtros espelhados em quadraturas (DAUBECHIES, 1992), 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 (Figura 3.2).

Dependendo do número de amostras do sinal original, os coeficientes de aproximação da primeira escala podem ser decompostos em mais duas componentes:

$$c_2(k) = \sum_n g(n - 2k)c_1(n), \quad (3.5)$$

$$d_2(k) = \sum_n h(n - 2k)c_1(n), \quad (3.6)$$

em que c_2 e d_2 são os coeficientes de aproximação e *wavelet* da segunda escala, respectivamente. A componente c_2 pode ser decomposta em mais duas componentes, e assim por diante (análise multirresolucional). Na Figura 3.3 apresenta-se o processo de decomposição do sinal c_0 até a terceira escala.

¹A frequência de amostragem de um sinal analógico, para que possa posteriormente ser reconstituído com o mínimo de perda de informação, deve ser igual ou maior a duas vezes a maior frequência do espectro desse sinal.

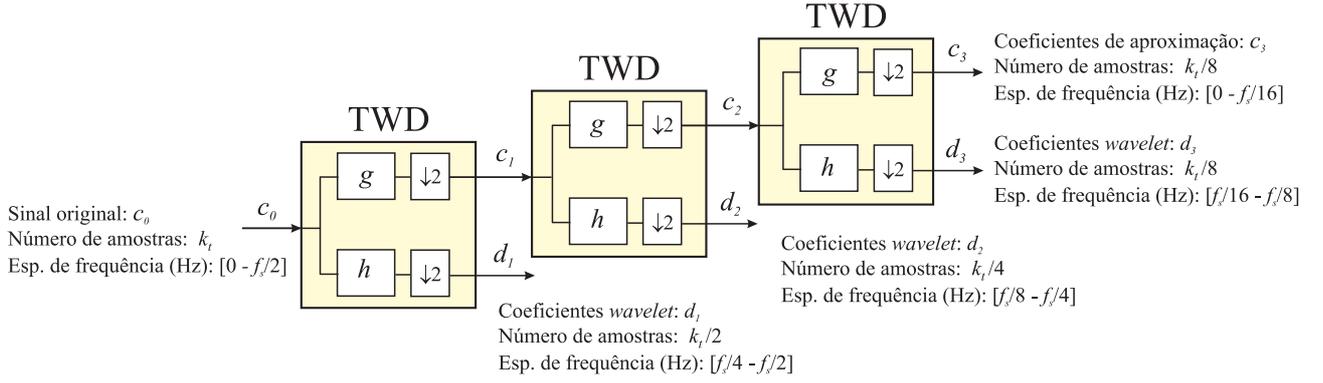


Figura 3.3. Três estágios da TWD.

No segundo nível de resolução, os coeficientes de aproximação e *wavelet* dividem o espectro de frequência dos coeficientes de aproximação da primeira escala em $[0, f_s/8]$ e $[f_s/8, f_s/4]$ Hz, respectivamente. Os espectros de frequência dos coeficientes de aproximação e *wavelet* em uma escala genérica j são, respectivamente:

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{j+1}}\right], \quad (3.7)$$

$$\left[\frac{f_s}{2^{j+1}}, \frac{f_s}{2^j}\right]. \quad (3.8)$$

Conforme o exposto, o sinal original 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 do sinal original (k_t), que por sua vez, deve ser uma potência de dois. Desta forma, o número máximo de decomposições (J_{max}) pode ser obtido da equação

$$k_t = 2^{J_{max}-1}. \quad (3.9)$$

3.2 FILTROS WAVELET E FILTROS ESCALA DA TWD

Os coeficientes $g(l)$ dos filtros escala e $h(l)$ dos filtros *wavelet* da TWD satisfazem as seguintes propriedades (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\sum_{l=1}^L g(l) = \sqrt{2}, \quad \sum_{l=1}^L g^2(l) = 1, \quad \sum_{l=-\infty}^{+\infty} g(l)g(l+2n) = 0, \quad (3.10)$$

$$\sum_{l=1}^L h(l) = 0, \quad \sum_{l=1}^L h^2(l) = 1, \quad \sum_{l=-\infty}^{+\infty} h(l)h(l+2n) = 0, \quad (3.11)$$

com $n \in \mathbb{N}$ e $l=1,2,\dots,L$, em que L é o número de coeficientes dos filtros escala e *wavelet*. Além disso, esses filtros também são filtros espelhados em quadratura:

$$g(l) = (-1)^{l+1}h(L-l-1), \quad (3.12)$$

$$h(l) = (-1)^l g(L-l-1). \quad (3.13)$$

O número de coeficientes dos filtros escala e *wavelet*, assim como seus respectivos valores, dependem da *wavelet* mãe utilizada. Por exemplo, os coeficientes dos filtros escala da *wavelet* mãe db4 são (DAUBECHIES, 1992):

$$g(1) = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad g(2) = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad g(3) = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad g(4) = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}. \quad (3.14)$$

Conforme a Equação 3.13, os coeficientes dos filtros *wavelet* da *wavelet* mãe db4 são:

$$h(1) = g(4), \quad h(2) = -g(3), \quad h(3) = g(2), \quad h(4) = -g(1). \quad (3.15)$$

Na Figura 3.4 é ilustrada a resposta em frequência dos filtros escala e *wavelet* da db4, nas três primeiras escalas. Na primeira escala (Figura 3.4(a)), o espectro de frequência do sinal original é dividido pela metade (Equações 3.7 e 3.8), sendo o filtro escala um filtro passa-baixas e o filtro *wavelet*, um filtro passa-altas. Observa-se que, mesmo atenuadas, as componentes de alta frequência do sinal original influenciam no cálculo dos coeficientes de aproximação, enquanto que as componentes de baixa frequência do sinal original também influenciam no cálculo dos coeficientes *wavelet*. Na segunda escala, o espectro de frequência dos coeficientes de aproximação da primeira escala é particionado em termos dos coeficientes de aproximação e *wavelet*, conforme a resposta em frequência dos filtros passa-baixas e passa-altas ilustrados na Figura 3.4(b). Na terceira escala, a resposta em frequência dos filtros escala e *wavelet* é função da resposta em frequência do filtro escala da segunda escala (Figura 3.4(c)).

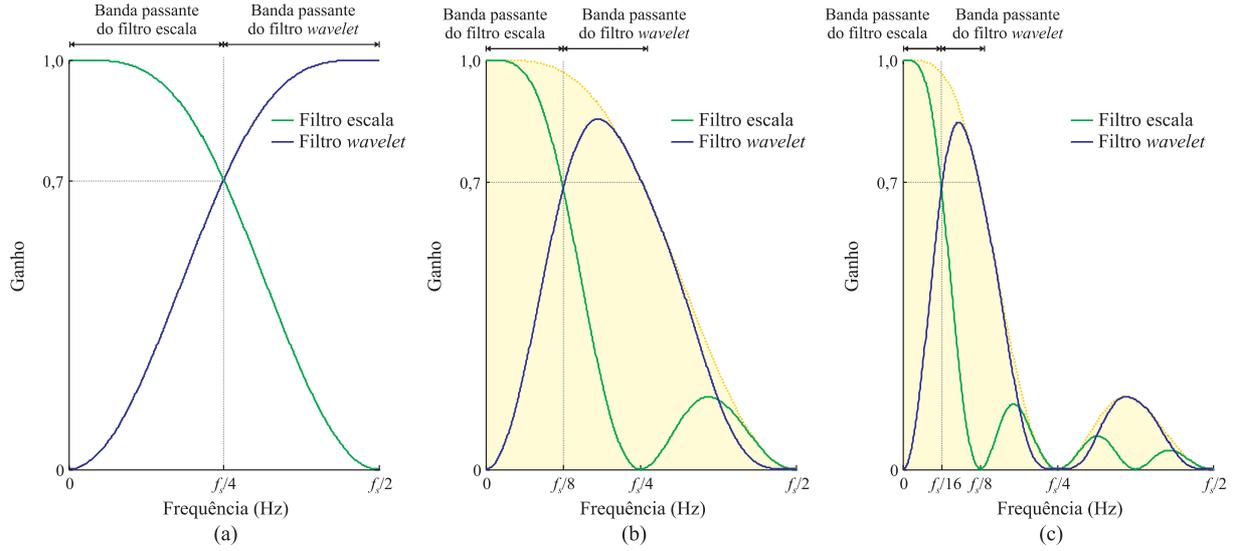


Figura 3.4. Resposta em frequência dos filtros escala e *wavelet* da Daubechies 4: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala.

3.3 ALGORITMO PIRAMIDAL PARA CÁLCULO DA TWD - FORMA MATRICIAL

Os coeficientes de aproximação c_1 e *wavelet* d_1 da primeira escala de um sinal discreto x , constituído de k_t amostras, possuem $k_t/2$ amostras devido ao processo de subamostragem por um fator de dois. Aplicando apenas um estágio da TWD, então k_t deve ser um número inteiro par, de modo que sua divisão por dois resulte em um número inteiro. Além disso, o número mínimo de amostras de x é igual ao número de coeficientes dos filtros escala e *wavelet* da *wavelet* mãe ($k_t \geq L$). Com relação à db4, tem-se $k_t \geq 4$.

Os coeficientes c_1 e d_1 calculados com o algoritmo piramidal da TWD são:

$$c_1 = A_1 x, \quad (3.16)$$

$$d_1 = B_1 x, \quad (3.17)$$

em que A_1 e B_1 são matrizes de ordem $(k_t/2) \times k_t$, visto que c_1 e d_1 têm $k_t/2$ elementos.

As matrizes A_1 e B_1 para a *wavelet* db4 são da forma (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$A_1 = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

As matrizes A_1 e B_1 são formadas a partir de deslocamentos circulares dos elementos da sua primeira linha. Para garantir o processo de subamostragem por dois das amostras do sinal x , aplicam-se dois deslocamentos de uma linha para outra. As colunas não ocupadas pelos coeficientes do filtro escala ou *wavelet* assumem valor nulo.

As Equações 3.16 e 3.17 podem ser reescritas como:

$$c_1 = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(1) \\ c_1(2) \\ c_1(3) \\ \vdots \\ c_1(k_t/2) \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

$$d_1 = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1(1) \\ d_1(2) \\ d_1(3) \\ \vdots \\ d_1(k_t/2) \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

De acordo com a Equação 3.21, o valor do primeiro coeficiente *wavelet* ($d_1(1)=h(3)x(1)+h(4)x(2)+h(1)x(k_t-1)+h(2)x(k_t)$) depende das duas amostras iniciais e finais. O trecho do sinal formado pelas duas últimas amostras seguidas pelas duas primeiras amostras pode apresentar uma descontinuidade. Neste caso, o primeiro coeficiente *wavelet* poderá ter amplitude consideravelmente diferenciada da amplitude dos coeficientes subsequentes. Esse fenômeno é conhecido como efeito de borda, presente também no primeiro coeficiente de aproximação $c_1(1)$.

Os filtros escala e *wavelet* referentes à db4 são compostos por quatro coeficientes ($L=4$). Desta forma, apenas o primeiro coeficiente de aproximação e *wavelet* apresenta o efeito de borda (Equações 3.20 e 3.21). Porém, dependendo do número de coeficientes dos filtros, mais de um coeficiente de aproximação e *wavelet* podem ser influenciados pelo efeito de borda.

Para exemplificar o uso da TWD, considere um sinal $x(t)=sen(2\pi ft) - 0,8e^{-\frac{t-t_0}{2}}u(t-t_0)$, composto por uma senóide à frequência fundamental $f=60$ Hz, somada a uma componente com decaimento exponencial no instante $t=t_0$, sendo $u(\cdot)$ uma função degrau. O sinal é discretizado a partir de $t=0$ s, com taxa de amostragem de $f_s=1200$ amostras/s. Apresenta-se a seguir um trecho do sinal discreto, composto por 26 amostras (aproximadamente $1+1/4$ de ciclo), com a componente de decaimento exponencial iniciando na vigésima amostra

Conforme as Equações 3.16 e 3.17, os coeficientes de aproximação e *wavelet* na primeira escala são calculados da seguinte forma:

$$c_1 = \begin{bmatrix} 0,22 & -0,13 & 0,48 & 0,84 \\ 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 \\ 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 & 0 \\ 0 & 0,48 & 0,84 & 0,22 & -0,13 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,31 \\ 0,59 \\ 0,81 \\ 0,95 \\ 1,00 \\ 0,95 \\ 0,81 \\ . \\ . \\ -0,59 \\ -1,11 \\ -0,49 \\ 0,01 \\ 0,41 \\ 0,70 \\ 0,89 \\ 0,96 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,19 \\ 0,29 \\ 1,04 \\ 1,40 \\ 1,23 \\ 0,58 \\ -0,29 \\ -1,04 \\ -1,40 \\ -1,12 \\ -1,32 \\ -0,22 \\ 0,86 \end{bmatrix}, \quad (3.25)$$

$$d_1 = \begin{bmatrix} 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 \\ -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 \\ 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 & 0 \\ 0 & -0,13 & -0,22 & 0,84 & -0,48 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,31 \\ 0,59 \\ 0,81 \\ 0,95 \\ 1,00 \\ 0,95 \\ 0,81 \\ . \\ . \\ -0,59 \\ -1,11 \\ -0,49 \\ 0,01 \\ 0,41 \\ 0,70 \\ 0,89 \\ 0,96 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,48 \\ 0,03 \\ 0,06 \\ 0,06 \\ 0,04 \\ 0,00 \\ -0,03 \\ -0,06 \\ -0,06 \\ 0,35 \\ -0,09 \\ 0,07 \\ 0,07 \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

Na Figura 3.5 são apresentadas as versões contínua $x(t)$ e discreta $x(k)$ do sinal original, destacando-se o instante de ocorrência da componente com decaimento exponencial, na vigésima amostra do sinal discreto. Os coeficientes de aproximação e *wavelet*, da primeira escala, obtidos das Equações 3.25 e 3.26 são ilustrados na Figura 3.6. Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos após utilização da TWD, as amostras dos coeficientes de aproximação na Figura 3.6 são representadas por interpolações lineares, enquanto as amostras referentes aos coeficientes *wavelet* são representadas por impulsos. Os efeitos de borda são observados na primeira amostra dos coeficientes de aproximação e *wavelet* da Figura 3.6, conforme o processo de formação das matrizes A_1 e B_1 (Equações 3.18 e 3.19).

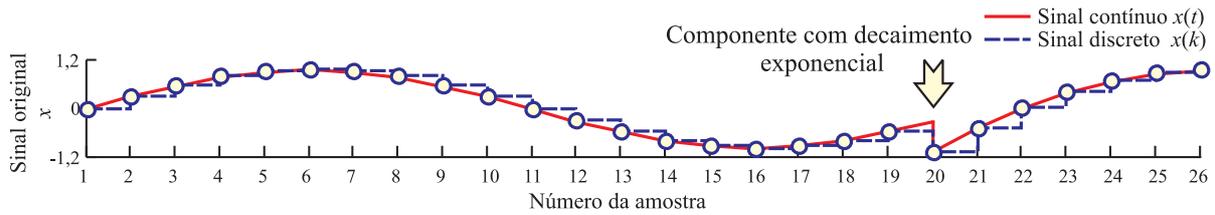
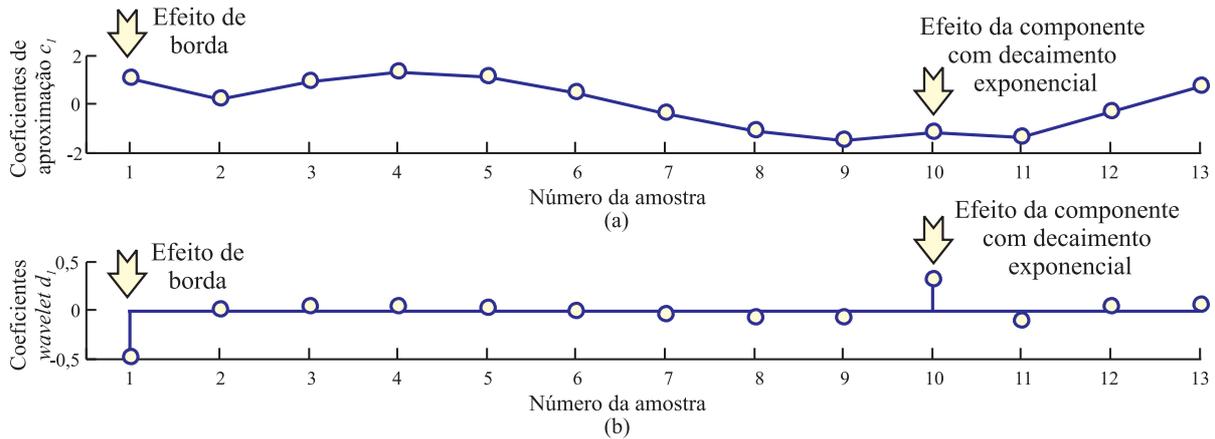


Figura 3.5. Sinal original.

Figura 3.6. Coeficientes após aplicação da TWD: (a) aproximação; (b) *wavelet*.

O sinal original (sinal discreto) ilustrado na Figura 3.5 é essencialmente, uma senóide com frequência fundamental de 60 Hz (baixa frequência). Nestas condições, os coeficientes de aproximação da primeira escala, cujo espectro de frequência varia de DC a 300 Hz, são predominantemente influenciados pela componente fundamental do sinal, apresentando forma similar a essa componente. Os coeficientes *wavelet* da primeira escala, cujo espectro de frequência varia de 300 a 600 Hz, são apropriados à detecção e localização de mudanças abruptas e transitórios rápidos ocorridos ao longo do sinal original. De fato, conforme ilustrado na Figura 3.6, o coeficiente *wavelet* $d_1(10)$ apresenta amplitude superior aos demais coeficientes, indicando a ocorrência de uma perturbação em $x(20)$. Este é o princípio básico do método de detecção de distúrbios apresentado nesta tese.

Devido ao processo de subamostragem por um fator de dois, uma amostra k dos coeficientes *wavelet* corresponde à amostra $2k$ do sinal original. No entanto, o instante de tempo associado a essas amostras é o mesmo.

3.4 EFEITO DA SUBAMOSTRAGEM NO CÁLCULO DOS COEFICIENTES WAVELET DA TWD

A TWD é uma transformada variante com o tempo devido à subamostragem empregada às amostras do sinal. Como consequência, os coeficientes *wavelet* podem apresentar formas distintas, dependendo das amostras utilizadas no cálculo dos coeficientes.

Para avaliar o efeito da subamostragem dos coeficientes *wavelet* da TWD, na Figura 3.7 apresentam-se novamente os sinais contínuo e discreto ilustrados na Figura 3.5 e os respectivos coeficientes *wavelet* da primeira escala. Porém, a primeira amostra do sinal discreto da Figura 3.5 foi descartada e uma nova amostra foi adicionada ao término do sinal. Novamente, o coeficiente $d_1(10)$ é o primeiro coeficiente influenciado pela componente de decaimento exponencial, ocorrida em $x(19)$ e, como esperado, $d_1(10)$ indica a presença da componente de decaimento exponencial no sinal. No entanto, ao contrário do caso ilustrado na Figura 3.6(b), o instante de ocorrência da componente de decaimento exponencial só foi identificado uma amostra após a sua ocorrência (após 0,83 ms ou 18°).

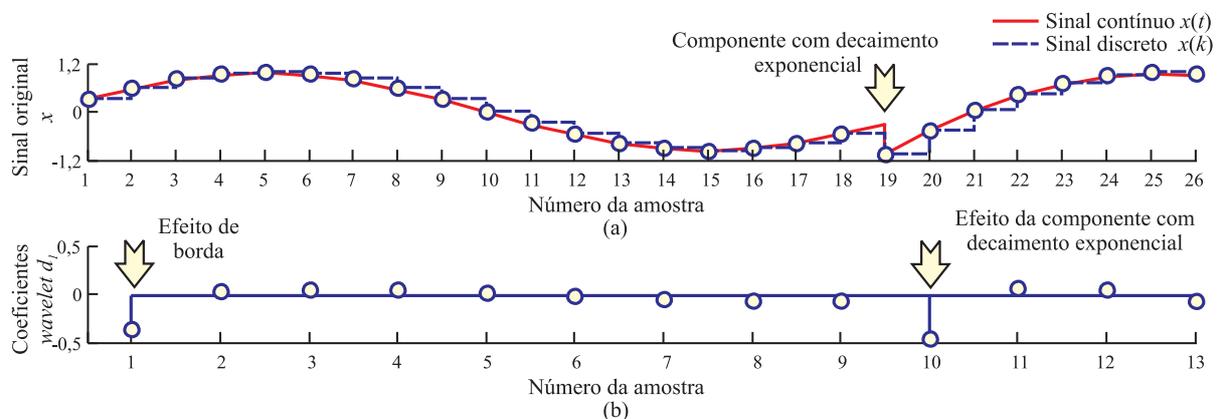


Figura 3.7. Efeito da subamostragem na identificação de distorções: (a) sinal original; (b) coeficientes *wavelet*.

Após análise das Figuras 3.6 e 3.7, conclui-se que o processo de subamostragem pode comprometer o uso da TWD em aplicações específicas, a exemplo da detecção de ondas viajantes para localização de faltas. Nestes casos, uma variante da TWD que não realiza o processo de subamostragem das amostras, denominada transformada *wavelet* discreta invariante no tempo ou redundante (TWDR) (PERCIVAL; WALDEN, 2000), pode ser mais apropriada.

De um modo geral, as principais diferenças entre a TWD e a TWDR são:

- Ao contrário da TWD, a TWDR não realiza a subamostragem por dois nas amostras do sinal, daí o termo redundante. Portanto, a TWDR é uma transformada invariante no tempo.
- A TWDR é uma transformada não-ortogonal, já a TWD é ortonormal.
- A TWDR pode ser aplicada a qualquer número de amostras, enquanto que a TWD requer que este número seja uma potência de dois.

3.5 FILTROS WAVELET E FILTROS ESCALA DA TWDR

Os coeficientes $\tilde{g}(l)$ dos filtros escala e $\tilde{h}(l)$ dos filtros *wavelet* da TWDR são obtidos dos correspondentes filtros da TWD, como segue (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\tilde{g}(l) = g(l)/\sqrt{2}, \quad (3.27)$$

$$\tilde{h}(l) = h(l)/\sqrt{2}, \quad (3.28)$$

em que $g(l)$ e $h(l)$ são, respectivamente, os coeficientes dos filtros escala e *wavelet* da TWD, de modo que os coeficientes $\tilde{g}(l)$ e $\tilde{h}(l)$ satisfazem as seguintes propriedades:

$$\sum_{l=1}^L \tilde{g}(l) = 1, \quad \sum_{l=1}^L \tilde{g}^2(l) = \frac{1}{2}, \quad \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(l)\tilde{g}(l+2n) = 0, \quad (3.29)$$

$$\sum_{l=1}^L \tilde{h}(l) = 0, \quad \sum_{l=1}^L \tilde{h}^2(l) = \frac{1}{2}, \quad \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(l)\tilde{h}(l+2n) = 0, \quad (3.30)$$

com $n \in \mathbb{N}$ e $l=1,2,\dots,L$, em que L é o número de coeficientes dos filtros escala e *wavelet*. Além disso, da mesma forma que na TWD, esses filtros também são filtros em quadratura espelhados:

$$\tilde{g}(l) = (-1)^{l+1}\tilde{h}(L-l-1), \quad (3.31)$$

$$\tilde{h}(l) = (-1)^l\tilde{g}(L-l-1). \quad (3.32)$$

O número de coeficientes dos filtros escala e *wavelet*, assim como seus respectivos valores, dependem da *wavelet* mãe utilizada. Por exemplo, os coeficientes dos filtros escala da *wavelet* mãe db4 são (vide Equação 3.14):

$$\tilde{g}(1) = \frac{1 + \sqrt{3}}{8}, \quad \tilde{g}(2) = \frac{3 + \sqrt{3}}{8}, \quad \tilde{g}(3) = \frac{3 - \sqrt{3}}{8}, \quad \tilde{g}(4) = \frac{1 - \sqrt{3}}{8}. \quad (3.33)$$

Conforme as Equações 3.32 e 3.33, os coeficientes dos filtros *wavelet* da db4 são:

$$\tilde{h}(1) = \tilde{g}(4), \quad \tilde{h}(2) = -\tilde{g}(3), \quad \tilde{h}(3) = \tilde{g}(2), \quad \tilde{h}(4) = -\tilde{g}(1). \quad (3.34)$$

3.6 ALGORITMO PIRAMIDAL PARA CÁLCULO DA TWDR - FORMA MATRICIAL

Ao contrário da TWD, após a aplicação da TWDR em um sinal discreto x , constituído de k_t amostras, os coeficientes de aproximação c_1 e *wavelet* d_1 do primeiro nível de resolução possuem k_t amostras, visto que não há subamostragem. Calculando apenas os coeficientes de aproximação e *wavelet* da primeira escala, k_t pode ser um número inteiro par ou ímpar, com número mínimo de amostras igual ao número de coeficientes dos filtros escala e *wavelet* da *wavelet* mãe, ou seja, $k_t \geq L$.

Os coeficientes de aproximação c_1 e *wavelet* d_1 da primeira escala do algoritmo piramidal da TWDR são calculados como:

$$c_1 = \tilde{A}_1 x, \quad (3.35)$$

$$d_1 = \tilde{B}_1 x, \quad (3.36)$$

em que \tilde{A}_1 e \tilde{B}_1 são matrizes de ordem $k_t \times k_t$, visto que c_1 e d_1 têm k_t elementos.

As matrizes \tilde{A}_1 e \tilde{B}_1 para a *wavelet* mãe db4 são da forma (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) \\ \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) \\ \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{g}(1) \\ \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) \end{bmatrix}, \quad (3.37)$$

$$\tilde{B}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) \\ \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) \\ \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{h}(1) \\ \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) \end{bmatrix}. \quad (3.38)$$

Observa-se nas Equações 3.37 e 3.38, que as matrizes \tilde{A}_1 e \tilde{B}_1 são formadas a partir de deslocamentos circulares dos coeficientes dos filtros escala e *wavelet* da TWDR, respectivamente.

As Equações 3.35 e 3.36 podem ser reescritas como:

$$c_1 = \begin{bmatrix} \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) \\ \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) \\ \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{g}(1) \\ \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ x(5) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(1) \\ c_1(2) \\ c_1(3) \\ c_1(4) \\ c_1(5) \\ \vdots \\ c_1(k_t) \end{bmatrix}, \quad (3.39)$$

$$d_1 = \begin{bmatrix} \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) \\ \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) \\ \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{h}(1) \\ \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ x(5) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1(1) \\ d_1(2) \\ d_1(3) \\ d_1(4) \\ d_1(5) \\ \vdots \\ d_1(k_t) \end{bmatrix}. \quad (3.40)$$

Conforme as Equações 3.39 e 3.40, o valor dos primeiros coeficientes de aproximação e *wavelet* dependem, respectivamente, das amostras iniciais e finais do sinal. Na primeira escala, observa-se o efeito de borda nos primeiros $L-1$ coeficientes de aproximação e *wavelet* da TWDR.

Na Figura 3.8 são ilustrados o sinal $x(k)$ (Figura 3.5) e os respectivos coeficientes *wavelet* da TWDR, calculados com a db4 ($L=4$). Comparando os coeficientes *wavelet* obtidos com a TWD (Figuras 3.6(b) e 3.7(b)) e com a TWDR (Figura 3.8(b)), constata-se que a TWDR apresenta vantagens na detecção de distorções no sinal por ser invariante com o tempo.

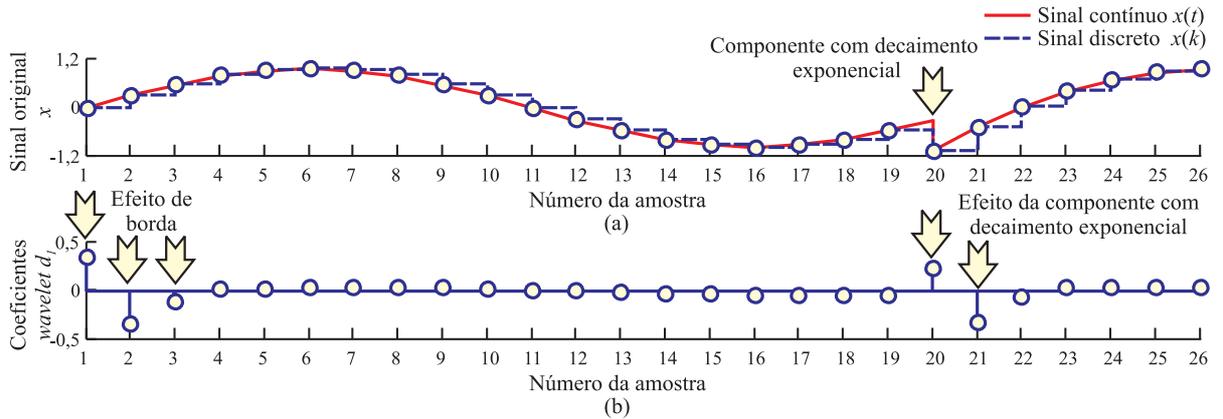


Figura 3.8. Cálculo dos coeficientes *wavelet* da TWDR: (a) sinal original; (b) coeficientes *wavelet*.

3.7 COEFICIENTES WAVELET DA TWD E DA TWDR EM TEMPO REAL

Conforme as Equações 3.17 e 3.19, desprezando-se as operações aritméticas dos elementos da matriz B_1 com valor nulo, o cálculo de um coeficiente *wavelet* da TWD é realizado a cada duas amostras do sinal original x , por meio de L operações de multiplicação e $L-1$ operações de adição, em que L é o número de coeficientes do filtro *wavelet*. Em tempo real, o cálculo de um coeficiente *wavelet* da TWD (t_W) deve ser realizado em um tempo inferior ao da amostragem do sinal ($\Delta t=1/f_s$), ou seja

$$t_W \leq 2\Delta t. \quad (3.41)$$

Os coeficientes *wavelet* da TWDR também são calculados com L operações de multiplicação e $L-1$ operações de adição. Porém, os cálculos devem ser realizados a cada amostra do sinal original x , ou seja

$$t_W \leq \Delta t. \quad (3.42)$$

O tempo gasto para o cálculo de um coeficiente de aproximação também é t_W . Portanto, para o cálculo de ambos os coeficientes, *wavelet* e aproximação, é preciso levar em consideração o tempo gasto para o cálculo de cada um deles, de maneira que $2\Delta t$ para a TWD ou Δt para TWDR não seja extrapolado.

O cálculo dos coeficientes de aproximação e *wavelet* da TWD, em tempo real, é realizado com as últimas L amostras de x , ou seja, os coeficientes com efeito de borda das Equações 3.20 e 3.21 não podem ser calculados. Considerando o instante de cálculo do primeiro coeficiente *wavelet* e de aproximação como referência ($k=0$), após a L -ésima amostragem de $x(k)$, os coeficientes da TWD em tempo real são calculados por:

$$d_1(k) = \sum_{l=1}^L h(l)x(2k+l-L), \quad (3.43)$$

$$c_1(k) = \sum_{l=1}^L g(l)x(2k+l-L), \quad (3.44)$$

desde que $\exists\{x(2k-L+1), \dots, x(2k-1), x(2k)\}$ e $t_w \leq 2\Delta t$.

Por analogia, os coeficientes *wavelet* e de aproximação da TWDR, em tempo real, são calculados por:

$$d_1(k) = \sum_{l=1}^L \tilde{h}(l)x(k+l-L), \quad (3.45)$$

$$c_1(k) = \sum_{l=1}^L \tilde{g}(l)x(k+l-L), \tag{3.46}$$

desde que $\exists\{x(k-L+1), \dots, x(k-1), x(k)\}$ e $t_w \leq \Delta t$.

Nas Figuras 3.9 e 3.10 são ilustrados os coeficientes *wavelet* da TWD e da TWDR do sinal $x(k)$ (Figura 3.5), obtidos com as Equações 3.44 e 3.46, respectivamente, considerando a db4 ($L=4$). O primeiro coeficiente *wavelet* em ambos os casos só foi calculado após a obtenção da quarta amostra de x , tomada como referência ($k=0$).

Com exceção dos coeficientes com os efeitos de borda, os coeficientes *wavelet* da TWD obtidos com o uso de matrizes (Figura 3.6(b)) e em tempo real (Figura 3.9(b)) apresentam exatamente as mesmas amplitudes. O mesmo comportamento é verificado nos coeficientes *wavelet* da TWDR (Figuras 3.8(b) e 3.10(b)). No entanto, em tempo real, as discontinuidades no sinal podem ser detectadas praticamente no instante de ocorrência.

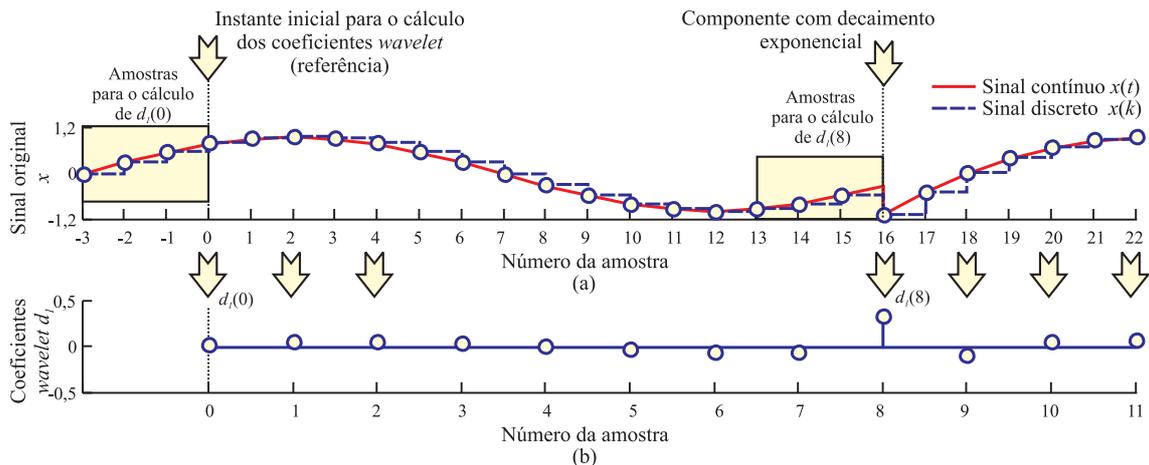


Figura 3.9. TWD em tempo real: (a) sinal original; (b) coeficientes *wavelet*.

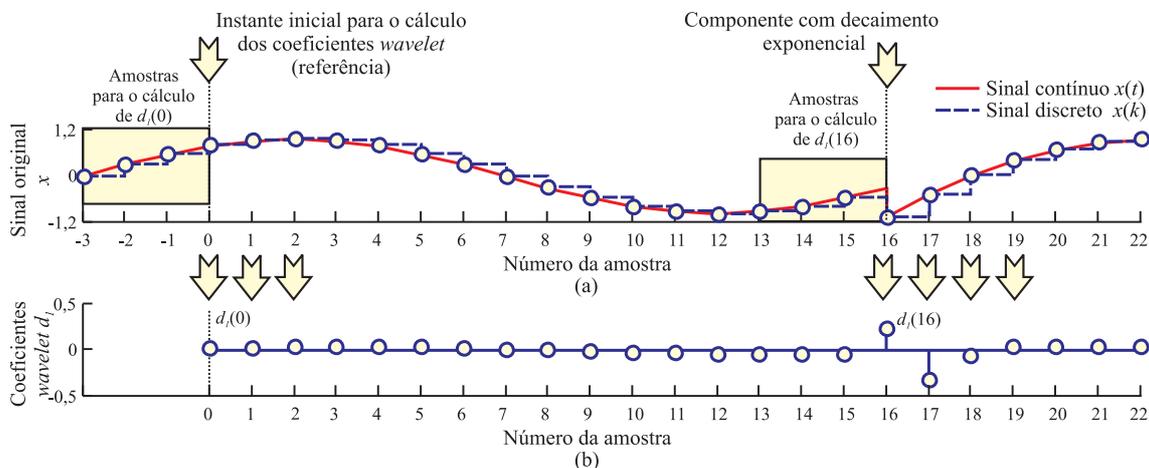


Figura 3.10. TWDR em tempo real: (a) sinal original; (b) coeficientes *wavelet*.

3.8 ENERGIA DOS COEFICIENTES WAVELET E DE APROXIMAÇÃO

Do teorema de Parseval (BURRUS *et al.*, 1998), a energia do sinal original x é igual a soma da energia dos coeficientes *wavelet* nos diferentes níveis de resolução, $j = \{1, 2, \dots, J\}$, com a energia dos coeficientes de aproximação no nível de resolução J , com $J \leq J_{max}$. Isso significa que a energia do sinal pode ser particionada em termos da energia dos coeficientes *wavelet* e de aproximação da TWD, como segue

$$\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2 = \sum_{k=1}^{k_t/2^J} |c_J(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{k_t/2^j} |d_j(k)|^2, \quad (3.47)$$

sendo:

$\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2$ - energia do sinal original,

$\sum_{k=1}^{k_t/2^J} |c_J(k)|^2$ - energia dos coeficientes de aproximação da escala J ,

$\sum_{k=1}^{k_t/2^j} |d_j(k)|^2$ - energia dos coeficientes *wavelet* da escala j .

O teorema de Parseval também é válido para a TWDR (PERCIVAL; WALDEN, 2000), como segue

$$\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2 = \sum_{k=1}^{k_t} |c_J(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{k_t} |d_j(k)|^2, \quad (3.48)$$

sendo:

$\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2$ - energia do sinal original,

$\sum_{k=1}^{k_t} |c_J(k)|^2$ - energia dos coeficientes de aproximação da escala J ,

$\sum_{k=1}^{k_t} |d_j(k)|^2$ - energia dos coeficientes *wavelet* da escala j .

Em sistemas elétricos de potência, o nível dos transitórios nas tensões ou correntes pode ser avaliado fazendo-se uso das energias desses transitórios (BOLLEN; GU, 2006), que podem ser usadas na análise dos distúrbios transitórios. No entanto, a extração dos transitórios nas tensões e correntes com distúrbios para o cálculo da energia não é uma tarefa simples, visto que os sinais possuem outras componentes de frequência, tais como a componente fundamental e harmônicas.

Uma vez que os transitórios geralmente contemplam uma ampla faixa de frequência (SWIFT, 1979; JOHNS *et al.*, 1994), a energia dos transitórios pode ser particionada em termos da energia dos coeficientes *wavelet* em várias escalas. Caso os coeficientes *wavelet*, em uma determinada escala, sejam predominantemente influenciados pelas componentes de frequência dos transitórios, a energia desses coeficientes *wavelet* possivelmente possa ser utilizada na detecção dos distúrbios transitórios.

Para verificar a correlação entre a energia dos coeficientes *wavelet* em várias escalas e a energia dos transitórios, considere um sinal teste composto pela componente fundamental, distorções harmônicas de ordem 3, 5 e 7, além de componentes transitórias com duas frequências dominantes. Um sinal similar a este foi utilizado por Bollen & Gu (2006) para análise do desempenho de técnicas de extração de transitórios.

O valor máximo da componente fundamental (V_1) do sinal teste apresenta ainda, uma variação aleatória ao longo do tempo, calculado com o modelo *random-walk*, como segue

$$V_1(k) = V_1(k - 1) + 0,096(\rho - 0,5), \quad (3.49)$$

sendo $V_1(1)=230\sqrt{2}$ V; $k>1$; ρ uma variável aleatória com distribuição de probabilidade normal no intervalo (0, 1). O mesmo modelo foi utilizado para o cálculo do valor máximo das componentes harmônicas de ordem 3, 5 e 7, como segue:

$$V_3(k) = V_3(k - 1) + 0,024(\rho - 0,5), \quad (3.50)$$

$$V_5(k) = V_5(k - 1) + 0,024(\rho - 0,5), \quad (3.51)$$

$$V_7(k) = V_7(k - 1) + 0,024(\rho - 0,5), \quad (3.52)$$

sendo $V_3(1)=5,75\sqrt{2}$ V; $V_5(1)=6,90\sqrt{2}$ V; $V_7(1)=3,45\sqrt{2}$ V.

O sinal em regime permanente (V_{rp}) é

$$V_{rp}(k) = V_1(k)\text{sen}\left(\frac{2\pi f}{f_s}k\right) + V_3(k)\text{sen}\left(3\frac{2\pi f}{f_s}k\right) + V_5(k)\text{sen}\left(5\frac{2\pi f}{f_s}k\right) + V_7(k)\text{sen}\left(7\frac{2\pi f}{f_s}k\right), \quad (3.53)$$

sendo utilizada uma taxa de amostragem de $f_s=7680$ amostras/s e um total de $k_t=1792$ amostras (14 ciclos).

Ao sinal em regime permanente é adicionado um sinal transitório, com decaimento exponencial, iniciando no quinto ciclo, sendo composto pelas componentes de frequência de 480 e 1300 Hz, com amplitudes de 25 e 10 V, respectivamente, como segue

$$V_{tr}(k) = \begin{cases} \left(25\sqrt{2}\cos\left(\frac{2\pi 480}{f_s}k\right) + 10\sqrt{2}\cos\left(\frac{2\pi 1300}{f_s}k\right) \right) e^{(5-kf/f_s)}u(k - 5f/f_s), & \text{se } \frac{5f_s}{f} \leq k \leq \frac{7f_s}{f} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.54)$$

Na Figura 3.11 é ilustrado o sinal teste, resultante da soma do sinal em regime permanente com o sinal transitório, dado por

$$V(k) = V_{rp}(k) + V_{tr}(k). \quad (3.55)$$

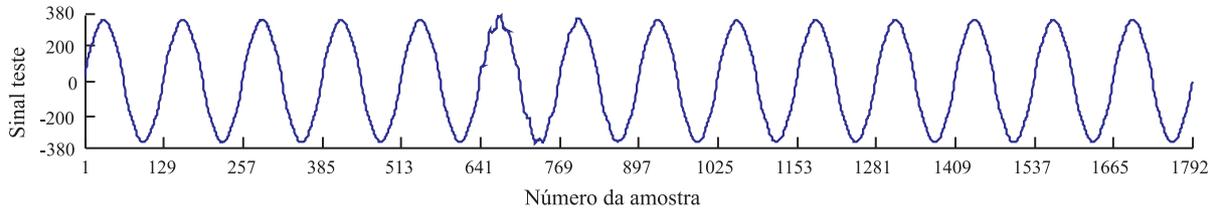


Figura 3.11. Sinal teste.

Na Figura 3.12 são ilustradas as respostas em frequência dos filtros escala e *wavelet* da db4 na primeira, segunda, terceira e quarta escalas, destacando-se no espectro de frequência a localização da componente fundamental, das componentes harmônicas e das duas componentes transitórias do sinal teste.

Conforme a Figura 3.12(a), os coeficientes *wavelet* da primeira escala são influenciados pela componente transitória de frequência dominante de 1300 Hz do sinal teste. Porém, os coeficientes *wavelet* também sofrem influência da componente transitória de 480 Hz. Ambas as componentes influenciam o cálculo dos coeficientes *wavelet* da segunda escala (Figura 3.12(b)). Por outro lado, os coeficientes *wavelet* da terceira escala praticamente não são influenciados pela componente transitória com frequência dominante de 1300 Hz (Figuras 3.12(c)), enquanto que os coeficientes *wavelet* da quarta escala são pouco influenciados pelas componentes transitórias de frequência dominante (480 e 1300 Hz) do sinal teste.

A energia dos transitórios do sinal teste é

$$E_{tr} = \sum_{k=1}^{k_t} |V_{tr}(k)|^2 = 20,81 \cdot 10^3. \quad (3.56)$$

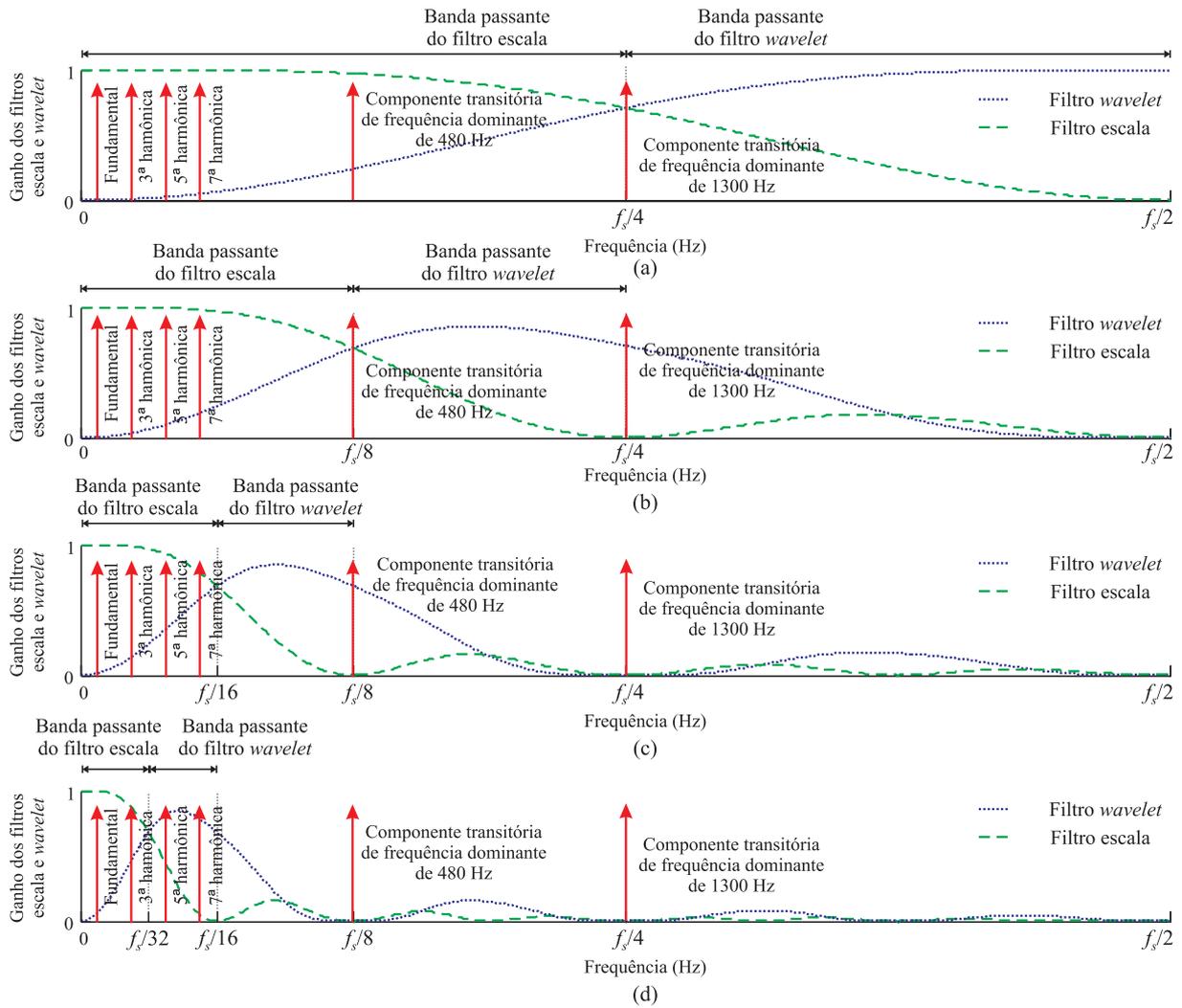


Figura 3.12. Resposta em frequência dos filtros escala e *wavelet* da Daubechies 4: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala; (d) quarta escala.

Para avaliar a correlação entre a energia dos transitórios e a energia dos coeficientes *wavelet* em várias escalas, propõe-se uma modificação nas componentes transitórias do sinal teste, tornando sua amplitude função de uma variável θ , como segue

$$V(k) = V_{rp}(k) + V_{tr}(k)\text{sen}(\theta). \tag{3.57}$$

A energia dos transitórios do sinal teste passa a ser

$$E_{tr}(\theta) = 20,81 \cdot 10^3 \text{sen}^2(\theta). \tag{3.58}$$

Com a Equação 3.57, o conteúdo de frequência do sinal teste independe de θ . Porém, a energia espectral dos transitórios varia senoidalmente com θ (Equação 3.58). Os valores de $\theta = \{0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 180^\circ\}$ foram utilizados para gerar 19 sinais testes, no qual foram mantidas as mesmas componentes V_{rp} e V_{tr} em todos os sinais. A energia dos transitórios, assim como as energias dos coeficientes *wavelet* da TWDR nas quatro primeiras escalas foram calculadas para cada sinal teste. Ao final, foram obtidas as curvas de energia em função de θ , ilustradas na Figura 3.13. Para cada curva de energia obtida foi feita uma análise de regressão, fazendo uso do método de ajuste de curvas convencional Levenberg-Marquardt no *Curve Fitting Toolbox* do Matlab[®], cujas equações em função de θ também são ilustradas na Figura 3.13.

Nas escalas avaliadas, a energia dos coeficientes *wavelet* apresentou o mesmo comportamento da energia dos transitórios: variação de amplitude com o quadrado da função seno de θ . As energias dos coeficientes *wavelet* apresentaram amplitudes distintas nas diversas escalas, conforme a resposta em frequência dos filtros *wavelet* (Figura 3.12).

A energia dos coeficientes *wavelet* em uma escala, cujos coeficientes são predominantemente influenciados pelas componentes de frequência dos transitórios, tais como a primeira e a segunda escala para o sinal teste, podem ser usadas para: avaliação do comportamento da energia dos transitórios em função de algum parâmetro, a exemplo dos transitórios de falta em função do ângulo de incidência; detecção dos distúrbios transitórios.

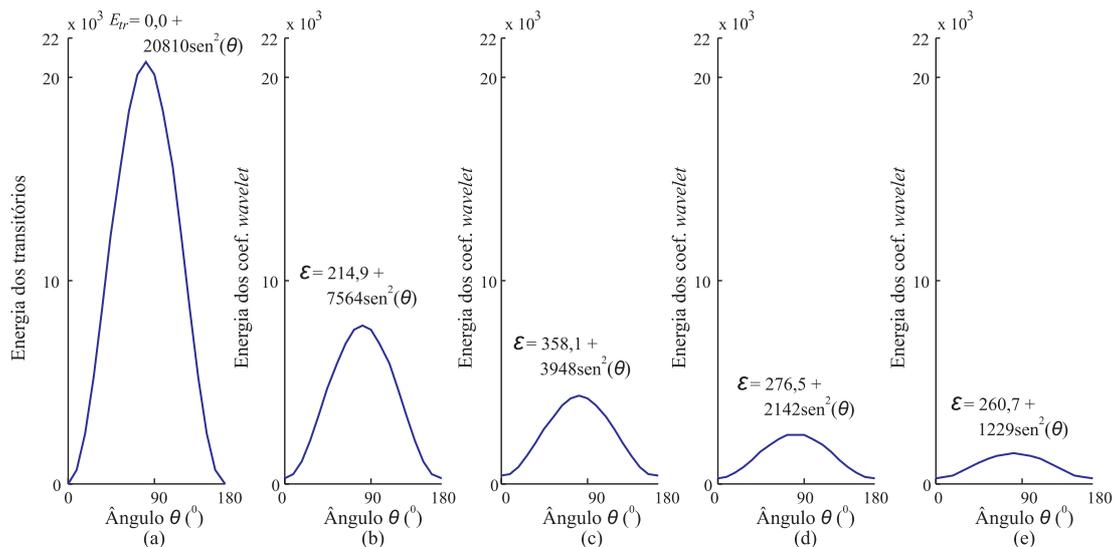


Figura 3.13. Energias: (a) transitórios; (b) coeficientes *wavelet* da primeira escala; (c) coeficientes *wavelet* da segunda escala; (d) coeficientes *wavelet* da terceira escala; (e) coeficientes *wavelet* da quarta escala.

Alguns distúrbios transitórios, tais como as faltas, são caracterizados por mais de um instante de incidência dos transitórios (instante inicial e final da falta). Portanto, com o uso da energia dos coeficientes *wavelet* da Equação 3.48 não é possível identificar a parcela de energia relacionada à cada etapa da falta. Esta limitação pode ser superada pelo uso da energia em um trecho específico dos coeficientes *wavelet* da TWD, em uma escala j , entre os coeficientes k_m e k_n , como segue

$$E_j(k_m, k_n) = \sum_{k=k_m}^{k_n} |d_j(k)|^2, \quad (3.59)$$

sendo $1 \leq k_m < k_n \leq k_t/2^j$; $k_t/2^j$ o número total de coeficientes da escala j .

A Equação 3.59 pode ser utilizada em aplicações que requerem análise da energia dos coeficientes *wavelet* de uma escala j , em intervalos fixos (janelas). Nesta tese, o número de coeficientes em uma janela para o cálculo da energia é equivalente ao número de amostras do sinal original em um ciclo ($\Delta k = f_s/f$). Portanto, devido ao efeito da subamostragem por dois a cada aplicação da TWD ao sinal original, a janela dos coeficientes *wavelet* da escala j possui $\Delta k/2^j$ coeficientes, enquanto que para a TWDR, a janela dos coeficientes em qualquer escala é composta por Δk coeficientes.

As energias janeladas dos coeficientes *wavelet* (\mathcal{E}_j) e dos coeficientes de aproximação ($\check{\mathcal{E}}_j$) da TWD, da escala j , são definidas como:

$$\mathcal{E}_j(k) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\Delta k/2^j} d_j^2(n), & \text{se } 1 \leq k \leq \frac{\Delta k}{2^j} \\ \sum_{n=k-\Delta k/2^j+1}^k d_j^2(n), & \text{se } \frac{\Delta k}{2^j} < k \leq \frac{k_f}{2^j} \end{cases}, \quad (3.60)$$

$$\check{\mathcal{E}}_j(k) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\Delta k/2^j} c_j^2(n), & \text{se } 1 \leq k \leq \frac{\Delta k}{2^j} \\ \sum_{n=k-\Delta k/2^j+1}^k c_j^2(n), & \text{se } \frac{\Delta k}{2^j} < k \leq \frac{k_f}{2^j} \end{cases}, \quad (3.61)$$

sendo $k = \{1, 2, \dots, k_f/2^j\}$ e k_f o número de amostras do sinal original.

De forma análoga a TWD, as energias janeladas dos coeficientes *wavelet* e de aproximação da TWDR, da escala j , são definidas como:

$$\mathcal{E}_j(k) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\Delta k} d_j^2(n), & \text{se } 1 \leq k \leq \Delta k \\ \sum_{n=k-\Delta k+1}^k d_j^2(n), & \text{se } \Delta k < k \leq k_f \end{cases}, \quad (3.62)$$

$$\check{\mathcal{E}}_j(k) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\Delta k} c_j^2(n), & \text{se } 1 \leq k \leq \Delta k \\ \sum_{n=k-\Delta k+1}^k c_j^2(n), & \text{se } \Delta k < k \leq k_f \end{cases}, \quad (3.63)$$

sendo $k = \{1, 2, \dots, k_f\}$.

Conforme as Equações 3.60 e 3.61, as energias janeladas da TWD podem ser utilizadas em aplicações em tempo real, visto que as energias referentes às componentes de frequência do último ciclo do sinal podem ser constantemente avaliadas. Em tempo real, as energias dos coeficientes *wavelet* e de aproximação, na primeira escala, podem ser calculadas após a obtenção de um novo coeficiente *wavelet* e de aproximação, também em tempo real, respectivamente, como segue:

$$\mathcal{E}(k) = \sum_{n=k-\Delta k/2+1}^k d_1^2(n), \quad (3.64)$$

$$\ddot{\mathcal{E}}(k) = \sum_{n=k-\Delta k/2+1}^k c_1^2(n), \quad (3.65)$$

desde que $\exists\{d_1(k-\frac{\Delta k}{2}+1), d_1(k-\frac{\Delta k}{2}+2), \dots, d_1(k)\}$ e $\exists\{c_1(k-\frac{\Delta k}{2}+1), c_1(k-\frac{\Delta k}{2}+2), \dots, c_1(k)\}$.

De forma análoga, as energias dos coeficientes *wavelet* e de aproximação da TWDR, na primeira escala, são calculadas em tempo real, após a obtenção de um novo coeficiente *wavelet* e de aproximação, respectivamente, como segue:

$$\mathcal{E}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k d_1^2(n), \quad (3.66)$$

$$\ddot{\mathcal{E}}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k c_1^2(n), \quad (3.67)$$

desde que $\exists\{d_1(k-\Delta k+1), d_1(k-\Delta k+2), \dots, d_1(k)\}$ e $\exists\{c_1(k-\Delta k+1), c_1(k-\Delta k+2), \dots, c_1(k)\}$.

Na Figura 3.14(a) são ilustrados o sinal teste da Figura 3.11, os respectivos coeficientes *wavelet* da primeira escalada da TWDR e a curva de energia, calculados com os algoritmos em tempo real, com a *wavelet* mãe db4. Observa-se que as energias apresentam valores praticamente constantes nos períodos correspondentes ao regime permanente. Porém, na ocorrência de transitórios, a amplitude das energias aumenta abruptamente, seguida por um decaimento à medida que os transitórios vão sendo amortecidos pelo sistema. Estas características das curvas de energia formam a base do método de detecção dos transitórios, em tempo real, discutidas no Capítulo 4.

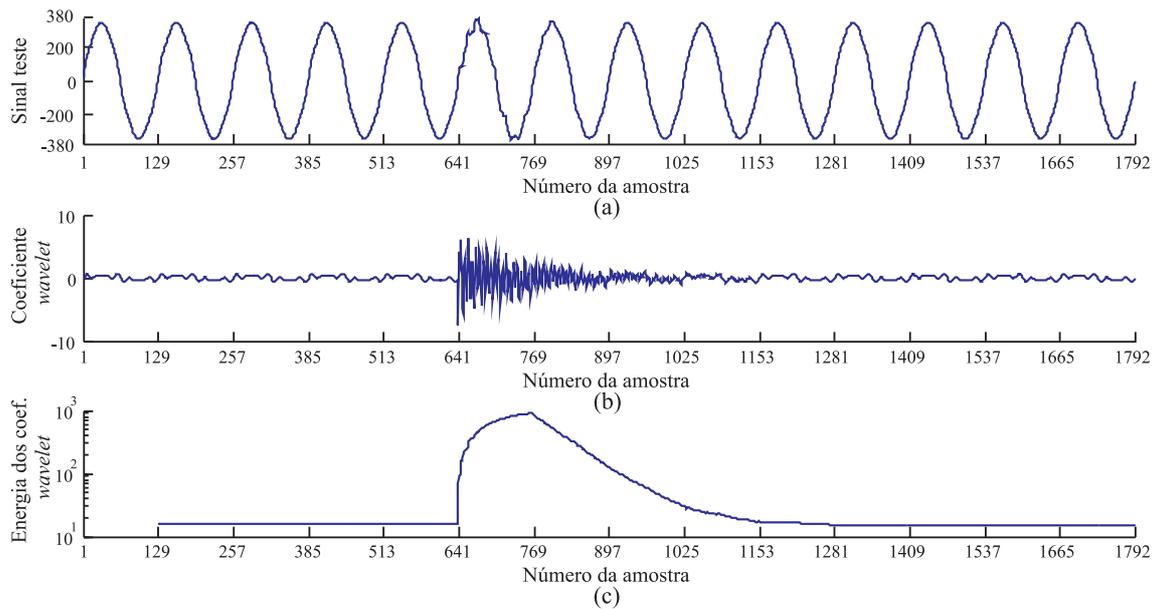


Figura 3.14. Cálculo da energia janelada com o algoritmo em tempo real: (a) sinal teste; (b) coeficientes *wavelet*; (c) energia janelada.

Ao contrário dos coeficientes *wavelet*, devido à resposta em frequência do filtro escala (baixas frequências), a energia janelada dos coeficientes de aproximação é apropriada à análise de distúrbios de regime permanente. É escopo desta tese a detecção e classificação de distúrbios transitórios, porém, alguns desses distúrbios apresentam elevação ou redução da amplitude da componente fundamental das tensões e/ou correntes, a exemplo dos afundamentos de tensão, cuja avaliação em tempo real das energias dos coeficientes de aproximação torna-se útil na precisão da classificação, discutida nos capítulos seguintes.

A implementação, em tempo real, do cálculo da energia dos coeficientes *wavelet* da tensão na fase A (v_A), na primeira escala, do método de diagnóstico proposto é mostrada de forma esquemática na Figura 3.15. A amostra k está associada ao instante, em tempo real, que muda a cada amostragem. Para cada solução do sistema elétrico, $v_A(k)$ é armazenada em um *buffer* com capacidade de armazenamento de quatro amostras de tensão, em que a última amostra é descartada. Em seguida, o coeficiente *wavelet* relacionado às últimas quatro amostras é calculado (Equação 3.46) e armazenado em um outro *buffer*, com capacidade de armazenamento de Δk coeficientes *wavelet* (janela de um ciclo), em que o último coeficiente é descartado. Por fim, a energia relacionada aos últimos Δk coeficientes *wavelet* é calculada (Equação 3.66) e armazenada em um outro *buffer*, com capacidade de armazenamento de Δk amostras de energias, em que a última amostra de energia é descartada. As últimas Δk amostras de energias são armazenadas e acessadas pelo método de detecção de distúrbios, descrito na próxima seção.

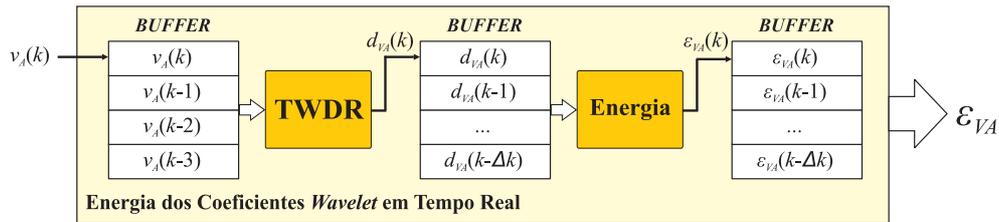


Figura 3.15. Cálculo em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet* da TWDR.

O procedimento ilustrado na Figura 3.15 é realizado para o cálculo, em tempo real, dos coeficientes *wavelet* e de aproximação de todas as tensões e correntes.

3.9 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A fundamentação teórica da TWD e da TWDR aplicada ao caso específico de detecção de transitórios foi apresentada neste capítulo. As transformadas foram comparadas e constatou-se que, em aplicações em tempo real, a TWDR pode apresentar vantagens sobre a TWD, no que concerne à detecção mais rápida dos transitórios, visto que ela não realiza o processo de subamostragem. Uma versão para o cálculo, em tempo real, dos coeficientes de aproximação e *wavelet* da TWD e TWDR foi apresentada neste capítulo.

Baseando-se no teorema de Parseval (BURRUS *et al.*, 1998; PERCIVAL; WALDEN, 2000), de que a energia de um sinal pode ser particionada em termos da energia dos coeficientes *wavelet* e de aproximação, mostrou-se que a análise em tempo real das energias dos coeficientes *wavelet* pode-se constituir em uma ferramenta poderosa para detecção de transitórios, sendo esta a base do método de diagnóstico de distúrbios transitórios proposto nesta tese. A análise em tempo real das energias dos coeficientes de aproximação também é importante para confirmação de alguns distúrbios, tais como afundamentos de tensão.

DIAGNÓSTICO DE DISTÚRBIOS TRANSITÓRIOS

Apresenta-se neste capítulo uma descrição detalhada dos principais distúrbios com transitórios em sistemas de potência, destacando-se o comportamento dos transitórios nas tensões e correntes (v_A, v_B, v_C, i_A, i_B e i_C), assim como os seus efeitos nas respectivas energias dos coeficientes *wavelet* ($\mathcal{E}_{v_A}, \mathcal{E}_{v_B}, \mathcal{E}_{v_C}, \mathcal{E}_{i_A}, \mathcal{E}_{i_B}$ e \mathcal{E}_{i_C}) e de aproximação ($\ddot{\mathcal{E}}_{v_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_B}, \ddot{\mathcal{E}}_{v_C}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_A}, \ddot{\mathcal{E}}_{i_B}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{i_C}$). O capítulo é concluído com a apresentação do fluxograma dos métodos de detecção e classificação em tempo real dos distúrbios transitórios.

Todas as tensões e correntes ilustradas neste capítulo são provenientes de registros oscilográficos reais do sistema de transmissão da Chesf, com taxa de amostragem de 15360 amostras/s. As energias dos coeficientes *wavelet* e de aproximação são calculadas com a TWDR, na primeira escala, fazendo uso da *wavelet* db4.

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 de transitórios, destacam-se os chaveamentos de cargas e de bancos de capacitores, assim como a ocorrência e eliminação das faltas.

Os transitórios são classificados conforme sua duração e amplitude em transitórios impulsivos e oscilatórios (Tabela 4.1) (DUGAN *et al.*, 2003). Apesar da curta duração, a análise dos transitórios é importante, visto que os equipamentos presentes no sistema elétrico podem ser submetidos à 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	$< 50 \text{ ns}$	-	-
	Microsegundo	$50 \text{ ns} - 1 \text{ ms}$	-	-
	Milissegundo	$> 1 \text{ ms}$	-	-
Oscilatórios	Baixa frequência	$0,3 - 50 \text{ ms}$	$< 5 \text{ kHz}$	0 - 4
	Média frequência	$20 \text{ } \mu\text{s}$	5 - 500 kHz	0 - 8
	Alta frequência	$5 \text{ } \mu\text{s}$	0,5 - 5 MHz	0 - 4

4.1.1 Transitórios Impulsivos

Transitórios impulsivos são mudanças repentinas nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, normalmente causados por descargas atmosféricas, que por sua vez podem ser classificadas em: descargas atmosféricas diretas, que atingem os condutores de fase, os cabos pára-raios ou as torres da LT; descargas atmosféricas indiretas, que ocorrem nas proximidades da LT. A queda direta de uma descarga em uma das fases de uma LT, por exemplo, resulta em ondas viajantes de tensão e corrente em ambos os sentidos (Figura 4.1). Nestas ocorrências, o nível da tensão normalmente ultrapassa a suportabilidade dos isolamentos das LTs, originando as faltas (ARAUJO; NEVES, 2005). De fato, em quase todos os casos, as descargas atmosféricas que atingem os condutores de fase resultam em faltas em LTs (BOLLEN; GU, 2006). As descargas indiretas também induzem sobretensões transitórias nas LTs.

Os transitórios impulsivos são caracterizados pelo tempo de subida da ordem de $1,2 \text{ } \mu\text{s}$, seguido por um decaimento da ordem de $50 \text{ } \mu\text{s}$ (CHOWDHURI, 1996; BOLLEN; GU, 2006). Uma análise detalhada desse tipo de distúrbio, portanto, requer dos equipamentos de monitoração uma taxa de amostragem alta (PROBERT; SONG, 2002). Na prática, um RDP não é um dispositivo de monitoramento apropriado à detecção de transitórios impulsivos, visto que a taxa de amostragem típica é de 10000 amostras/s (frequência de Nyquist de 5 kHz). Além disso, possuem filtros *anti-aliasing* (passa-baixos) com frequência de corte inferior à frequência de Nyquist (BOLLEN; GU, 2006) e os transformadores de instrumentos típicos não possuem resposta em frequência adequada à reprodução dos sinais com transitórios impulsivos. Entretanto, as respostas do sistema às descargas atmosféricas, tais como as faltas em LTs podem ser detectadas pelos RDPs.

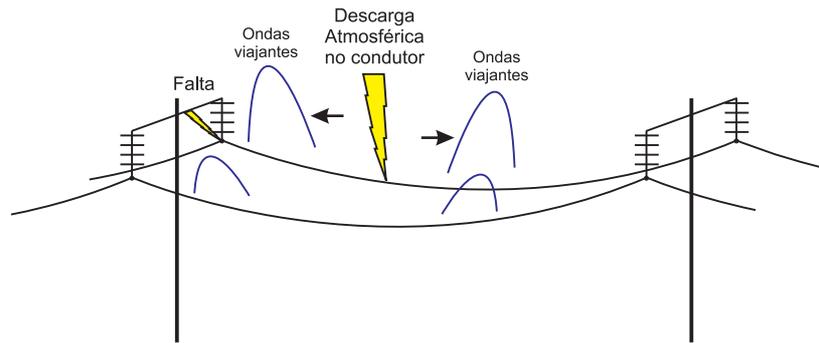


Figura 4.1. Descarga atmosférica no condutor de fase de uma linha de transmissão.

4.1.2 Transitórios Oscilatórios

Transitórios oscilatórios são fenômenos decorrentes das operações de chaveamento de cargas e de bancos de capacitores, eliminação de faltas, energização e desligamento de LTs. Os transitórios oscilatórios de alta frequência são tipicamente resultantes da resposta do sistema à transitórios impulsivos. Os transitórios oscilatórios de média frequência são usualmente resultantes da energização de bancos de capacitores, operações de chaveamento para eliminação de faltas, energização e desligamento de LTs, ou também, da resposta do sistema a um transitório impulsivo. Os transitórios oscilatórios de baixa frequência são geralmente causados pela energização de bancos de capacitores (DUGAN *et al.*, 2003).

Os distúrbios avaliados nesta tese apresentam transitórios oscilatórios decorrentes de faltas e manobras de chaveamento, dando-se destaque aos transitórios devido às manobras de energizações e desligamentos de LTs e de bancos de capacitores, faltas e afundamentos de tensão.

4.2 REGISTROS OSCILOGRÁFICOS SEM DISTÚRBIOS TRANSITÓRIOS

Os RDPs são dispositivos que têm como principal objetivo armazenar informações referentes às faltas e manobras de chaveamentos em registros oscilográficos, fornecendo assim, subsídios para posterior análise da operação dos sistemas de proteção, que inclui, por exemplo, a verificação do desempenho dos disjuntores (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006). No entanto, muitas vezes, os registros provenientes desses dispositivos não contêm informações acerca desses eventos, o que resulta na geração de registros oscilográficos sem distúrbios transitórios. Uma das possíveis causas desse problema é a parametrização inadequada dos métodos de disparos dos RDPs.

De modo geral, as tensões e correntes provenientes de registros oscilográficos reais, sem distúrbios transitórios, não são puramente senoidais, mas compostas por uma componente fundamental, somada a componentes harmônicas e ruídos com distribuição de probabilidade normal. Na Figura 4.2 são apresentadas as tensões e correntes de fase, em pu, de um registro real sem distúrbios transitórios, no qual se identificou a presença significativa das harmônicas de ordens 3, 4, 5, 6 e 7.

Na Figura 4.3 são apresentados os ruídos da corrente i_A , após a eliminação da componente fundamental e das componentes harmônicas de ordem 2, 3, 4, 5, 6 e 7, assim como o histograma da frequência relativa dos ruídos de i_A , destacando-se o valor médio (μ) e o desvio padrão (σ) dos ruídos. Observou-se que a curva da função densidade de probabilidade para uma variável aleatória com distribuição de probabilidade normal, com parâmetros μ e σ , apresenta forma similar ao histograma.

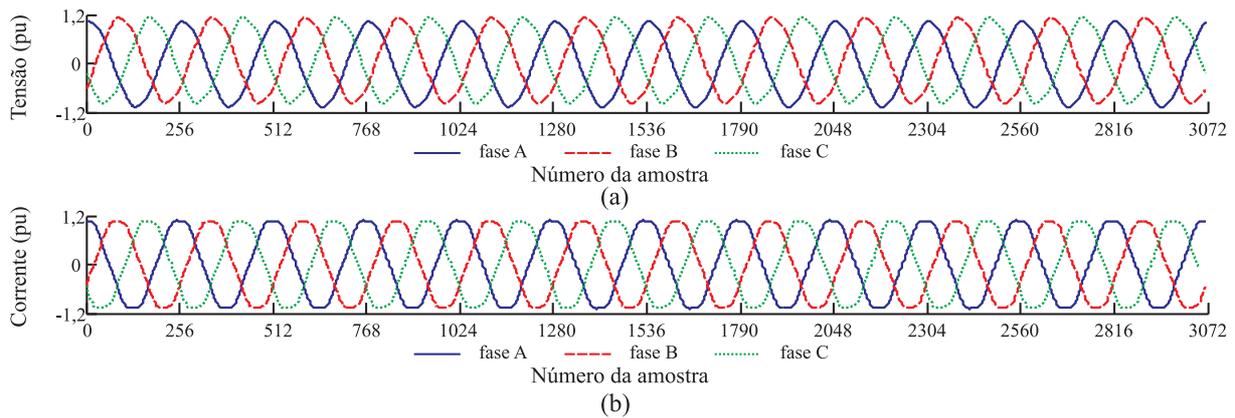


Figura 4.2. Registro oscilográfico real sem distúrbios: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

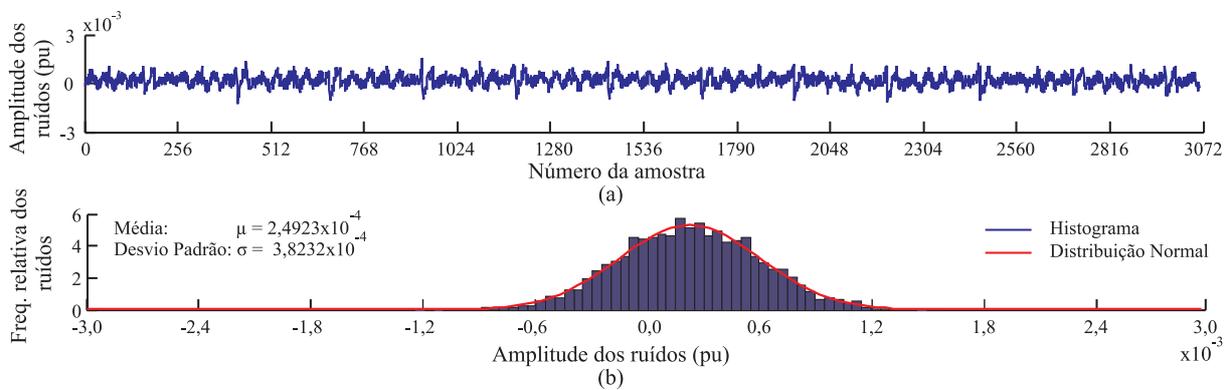


Figura 4.3. Registro oscilográfico sem distúrbios: (a) i_A sem a componente de frequência fundamental e harmônicas de ordem 2, 3, 4, 5 e 7; (b) histograma da frequência relativa dos ruídos de i_A .

Conforme a teoria *wavelet*, os coeficientes *wavelet* da primeira escala possuem banda de passagem de $f_s/4$ a $f_s/2$. Considerando sinais com taxa de amostragem de 15360 amostras/s, a componente de frequência fundamental e as componentes harmônicas de baixa ordem praticamente não influenciam no cálculo dos coeficientes *wavelet*, da primeira escala. Os ruídos de alta frequência, entretanto, influenciam sobremaneira no cálculo desses coeficientes.

Considerando os ruídos com distribuição de probabilidade normal, pode-se presumir que os coeficientes *wavelet* da TWDR, da primeira escala, de sinais sem distúrbios transitórios apresentem a mesma distribuição de probabilidade, conforme observado por Parsons *et al.* (1999) nos coeficientes *wavelet* da TWD. Os coeficientes *wavelet* da primeira escala de i_A , do registro sem distúrbios transitórios, calculados com a TWDR e *wavelet* db4, assim como o histograma da frequência relativa desses coeficientes são ilustrados na Figura 4.4, destacando-se o valor médio μ e o desvio padrão σ dos coeficientes *wavelet*. Também neste caso, a curva da função densidade de probabilidade para uma variável aleatória com distribuição de probabilidade normal, com parâmetros μ e σ , apresentou forma similar ao do histograma.

A curva de energia dos coeficientes *wavelet* da primeira escala \mathcal{E}_{i_A} , obtida por meio de uma janela deslizante de Δk coeficientes (um ciclo) e o histograma da frequência relativa da amplitude de \mathcal{E}_{i_A} são ilustrados na Figura 4.5. Observou-se que o histograma apresenta forma similar à curva de função densidade de probabilidade para uma variável aleatória com distribuição de probabilidade normal, com parâmetros μ e σ , sendo μ o valor médio e σ o desvio padrão de \mathcal{E}_{i_A} .

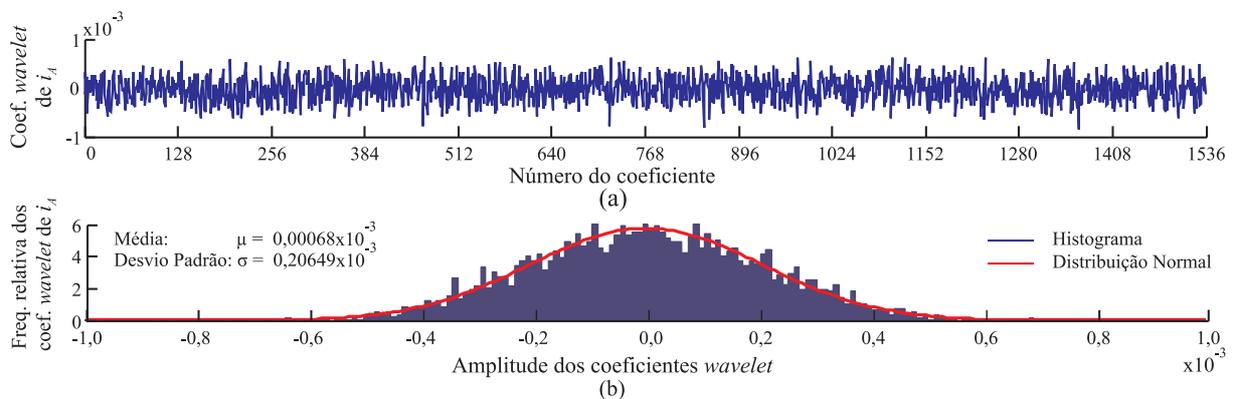


Figura 4.4. Análise *wavelet* de i_A : (a) coeficientes *wavelet* da primeira escala; (b) histograma da frequência relativa dos coeficientes *wavelet* da primeira escala.

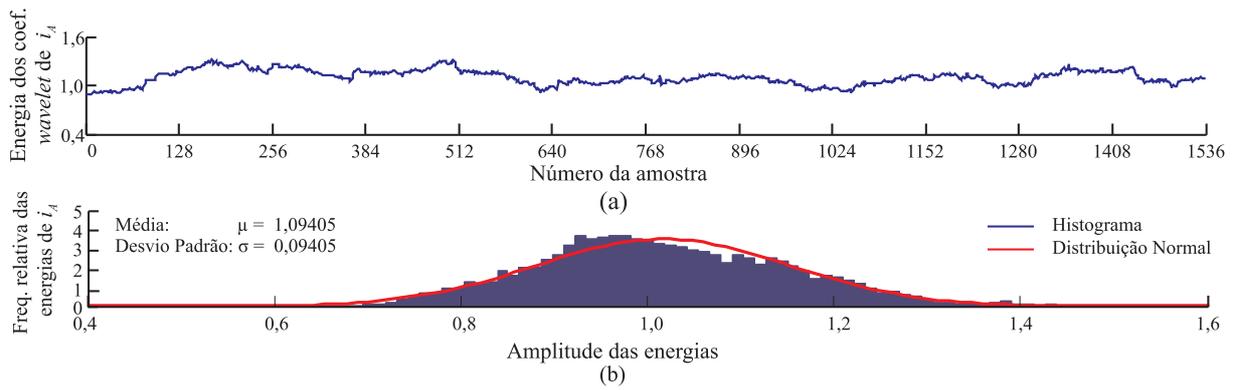


Figura 4.5. Análise *wavelet* de i_A : (a) \mathcal{E}_{i_A} ; (b) histograma da frequência relativa de \mathcal{E}_{i_A} .

Na Figura 4.6 são ilustradas as tensões e correntes de fase, em pu, de outro registro real sem distúrbios transitórios. A corrente i_A , após eliminação da componente fundamental e das componentes harmônicas de ordem 3 e 5, é ilustrada na Figura 4.7, na qual percebe-se uma distorção harmônica com duração de aproximadamente 8 ciclos.

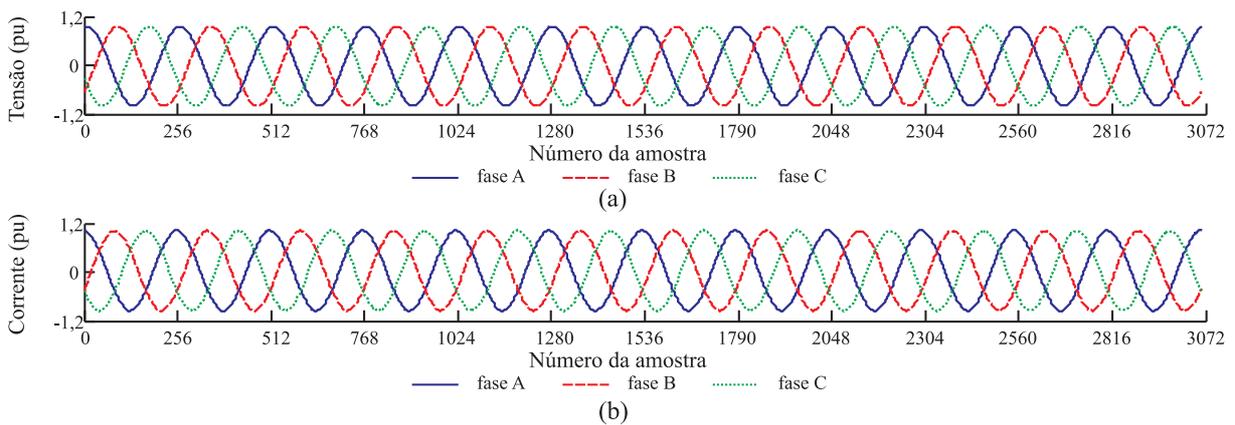


Figura 4.6. Registro oscilográfico real sem distúrbios: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

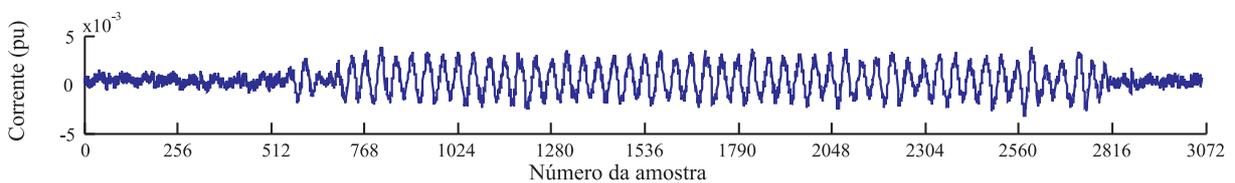


Figura 4.7. Corrente i_A sem a componente de 60 Hz e as harmônicas de ordem 3 e 5.

Na Figura 4.8 é ilustrada a amplitude de diversas componentes harmônicas de i_A , por ciclo, ao longo do registro oscilográfico (172 ciclos). O sinal possui distorções harmônicas de ordem 6 e 7 em alguns trechos do sinal, o que pode ter ocasionado a captura dos dados pelo RDP.

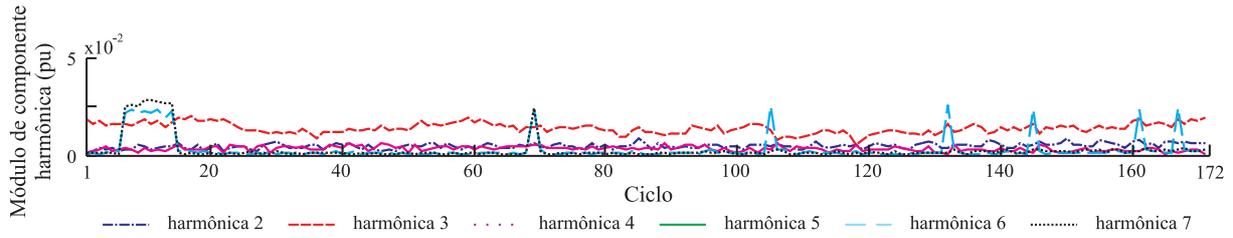


Figura 4.8. Módulo das componentes harmônicas de i_A , por ciclo.

Os coeficientes *wavelet* de i_A , do trecho ilustrado na Figura 4.6, e suas energias não foram influenciados pelas distorções harmônicas (Figuras 4.9(a) e (b)). De fato, conforme discutido no Capítulo 3, os coeficientes *wavelet* da primeira escala, para uma taxa de amostragem de 15360 amostras/s, são predominantemente influenciados pelos ruídos de alta frequência e transitórios, inexistentes neste registro. O histograma da frequência relativa de \mathcal{E}_{i_A} é ilustrado na Figura 4.9(c).

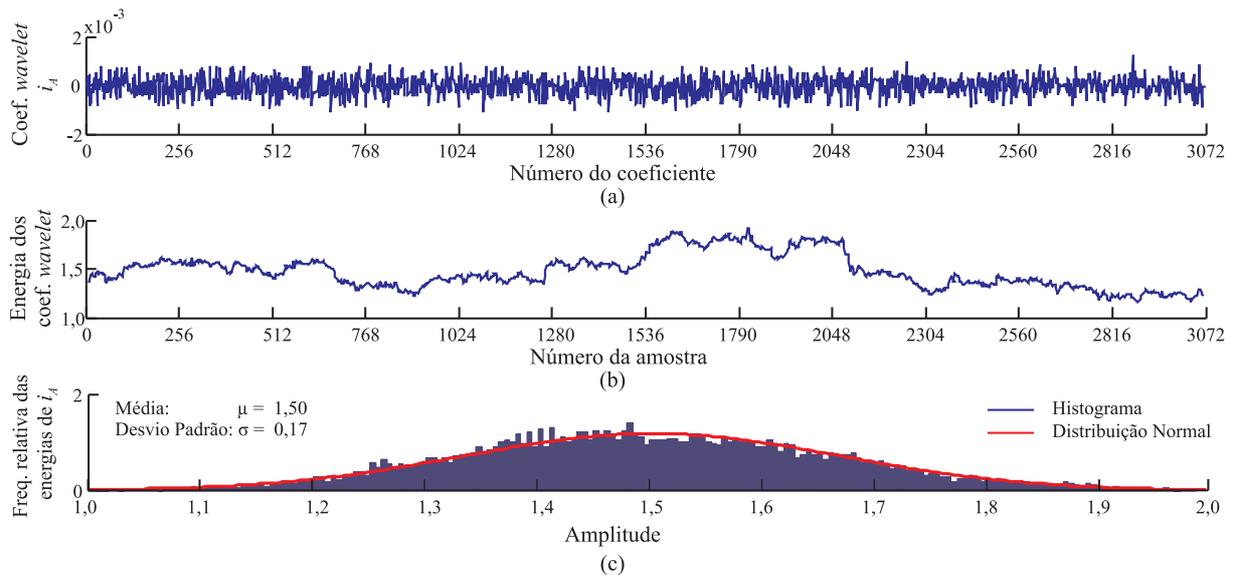


Figura 4.9. Análise *wavelet*: (a) coeficientes *wavelet* de i_A ; (b) \mathcal{E}_{i_A} ; (c) histograma da frequência relativa de \mathcal{E}_{i_A} .

Diversos registros oscilográficos reais sem distúrbios transitórios foram selecionados para análise estatística das energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} . Os registros selecionados foram amostrados a 15360 amostras/s, obtidos em diversos níveis de tensão (138, 230 e 500 kV), sendo todos eles provenientes de LTs distintas. Após análise estatística desses registros, constatou-se que as energias apresentaram distribuição de probabilidade similar à Gaussiana e não ocorrem variações acentuadas de energia em torno do valor médio.

O método de detecção em tempo real de distúrbios transitórios, detalhado mas adiante, baseia-se na ocorrência de variações acentuadas de energia em um intervalo de tempo muito curto (cinco amostras), o que não ocorre, normalmente, em registros com distorções harmônicas. Portanto, sinais como os das Figuras 4.2 e 4.6 não seriam armazenados em registros oscilográficos pelo RDP proposto nesta tese.

4.3 FALTAS

Faltas em sistemas elétricos de potência são caracterizadas como desligamentos não programados de seus componentes que podem ser provocadas por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica, originadas das condições adversas às quais o sistema está sempre submetido. De modo geral, algumas faltas podem ser evitadas com a manutenção programada dos equipamentos, entretanto, a maioria das faltas é ocasionada por fenômenos naturais, tais como: raios, acumulação de poeira ou gelo nos isoladores, chuvas, ventos fortes e queimadas. Vandalismo também pode ser a causa de faltas.

Na Figura 4.10 são ilustradas as tensões e correntes de fase, em pu, de um registro oscilográfico real com uma falta monofásica do tipo CT. De um modo geral, em uma situação de falta identificam-se três períodos distintos:

1. Período de pré-falta: compreende as amostras dos sinais referentes à situação de regime permanente do sistema elétrico, antes da ocorrência da falta.
2. Período de falta: corresponde ao período no qual o sistema encontra-se em uma situação de falta. Dependendo da natureza da falta e das condições elétricas do sistema, é comum o surgimento de um aumento nas correntes e um afundamento nas tensões das fases envolvidas na falta (BOLLEN, 2000).
3. Período de pós-falta: contém as amostras dos sinais após a atuação da proteção.

A transição entre os diversos períodos em uma falta se caracteriza pela incidência de transitórios nas tensões e/ou correntes, denominados períodos transitórios (PTs). Nesta tese, o i -ésimo PT inicia-se na amostra k_i , como ilustrados na Figura 4.10

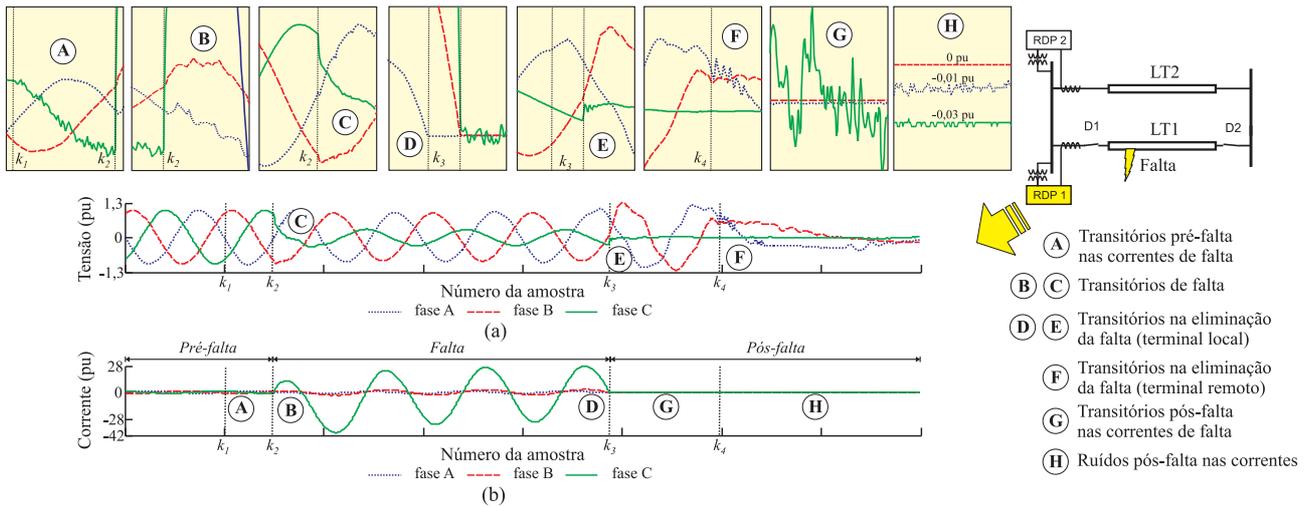


Figura 4.10. Registro oscilográfico real de uma falta CT: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

Estudo minucioso realizado nos registros oscilográficos reais revelou aspectos dos fenômenos transitórios dos distúrbios, dificilmente encontrados em simulações digitais, o que pode comprometer a aplicação prática de métodos de diagnóstico de faltas avaliados apenas com dados simulados. Apresentam-se a seguir, as principais características dos fenômenos transitórios observados na falta ilustrada na Figura 4.10 (COSTA *et al.*, 2010a):

1. Transitórios pré-falta nas correntes de falta

Análise de registros oscilográficos reais com falta mostrou, em alguns casos, a existência de oscilações de alta frequência (transitórios pré-falta) nas correntes de falta antes da ruptura dielétrica do meio isolante (Figura 4.10). Não se encontrou na literatura relato de nenhuma simulação que tenha levado em conta esses transitórios pré-falta. Dependendo da taxa de amostragem dos sinais, os transitórios pré-falta podem influenciar consideravelmente os coeficientes *wavelet* da primeira escala, dificultando a identificação precisa do instante inicial das faltas.

2. Transitórios de falta

Após a ocorrência de uma falta, sucessivas reflexões de ondas viajantes na LT originam transitórios nas tensões e correntes (SWIFT, 1979; GIRSI; BROWN, 1983). Conforme ilustrado na Figura 4.10, após a amostra k_2 (PT2), o instante inicial da falta é bem caracterizado pela incidência de transitórios nas tensões e correntes.

A natureza dos transitórios de falta depende de diversos fatores, tais como o ângulo de incidência, a resistência e a localização da falta. O espectro de frequência desses transitórios foi cuidadosamente investigado por (SWIFT, 1979) e deve ser levado em consideração para identificar a escala *wavelet* mais apropriada à detecção desses fenômenos, de acordo com a taxa de amostragem dos sinais.

Além dos transitórios devido às ondas viajantes, as correntes de falta durante o curto-circuito (de k_2 a k_3 em i_C) são normalmente compostas por uma componente senoidal à frequência fundamental, algumas harmônicas e uma componente DC, cujas amplitude e decaimento dependem de alguns fatores como o ângulo de incidência e a resistência de falta (BRADLEY *et al.*, 1978).

Na prática, os transformadores de corrente (TCs) são dimensionados para suportarem as sobrecorrentes de falta, sendo atribuída à componente DC a principal causa da saturação dos TCs durante a falta (BRADLEY *et al.*, 1978; KANG *et al.*, 2004), o que resulta em distorções nas correntes de falta no secundário dos TCs. Este fato pode influenciar sobremaneira no cálculo dos coeficientes *wavelet* (LI *et al.*, 2002; HONG; CHANG-CHIAN, 2008).

3. Transitórios na eliminação da falta (terminal local)

Em um sistema trifásico, as correntes nas fases A, B e C não são interrompidas simultaneamente. O acoplamento eletromagnético existente entre as fases de uma LT induz transitórios nas tensões e correntes de fase após a abertura do primeiro pólo (ZANETA Jr., 2003). Como consequência, a localização exata do instante de abertura do disjuntor para conter a falta pode não ser uma tarefa fácil.

4. Transitórios na eliminação da falta (terminal remoto)

Além da dispersão mecânica entre os contatos do disjuntor, outros fatores dificultam a identificação do instante final da falta. Os disjuntores em cada extremidade da LT podem abrir em instantes distintos, dependendo do esquema de proteção utilizado e do local de ocorrência da falta. A operação de um relé de distância, por exemplo, baseia-se em várias zonas de proteção. A primeira zona deve cobrir cerca de 80% da LT, sendo os 20% restantes protegidos pela zona secundária que cobre os 100% da LT e possui um atraso

na atuação da ordem de 200 à 500 ms (ANDERSON, 1999). Considerando o caso prático de um relé em cada terminal da LT, observa-se que em cerca de 40% da LT, a extinção completa da falta é retardada pelo atraso de segunda zona.

A falta ilustrada na Figura 4.10 ocorreu na primeira zona de um relé localizado no terminal monitorado (terminal local) e na segunda zona de outro relé, localizado no terminal remoto. O sistema de proteção atuou inicialmente no terminal local, abrindo o disjuntor no instante k_3 , seguido pela abertura do disjuntor no terminal remoto, ocorrida em k_4 .

Na Figura 4.10 destacam-se os transitórios nas tensões na eliminação da falta, no instante k_4 . Neste caso, os instantes referentes às duas manobras de chaveamento solicitadas pela proteção podem ser identificados pelo método proposto. Porém, a abertura do terminal monitorado é considerado o instante final da falta.

5. Transitórios pós-falta nas correntes de falta

Quando o sistema de proteção atua inicialmente no terminal local, seguido pelo terminal remoto, as correntes de falta no secundário do TC do terminal local podem apresentar transitórios até a extinção do arco elétrico na LT (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1982), como destacados na Figura 4.10, entre as amostras k_3 e k_4 . Esses transitórios influenciam o cálculo dos coeficientes *wavelet* da primeira escala, podendo dificultar a detecção e localização dos instantes em que a falta é eliminada.

6. Ruídos pós-falta nas correntes

Além das distorções, a representação da corrente de falta no secundário do TC não possui valor nulo no instante em que a corrente do primário do TC é interrompida. Quando a corrente de falta é interrompida por um disjuntor na sua passagem por zero, a corrente de falta do secundário do TC normalmente tem um valor positivo ou negativo. Como consequência, as correntes pós-falta apresentam um decaimento exponencial em função de uma constante de tempo, conforme o circuito do secundário do TC, e com pequenas oscilações (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1982). Essas características também podem influenciar no cálculo dos coeficientes *wavelet* da primeira escala.

7. Transitórios pós-falta nas tensões

Transitórios também podem ocorrer nas tensões do secundário dos transformadores de potencial capacitivos (TPCs) após eliminação de uma falta (BOLLEN, 2000).

O método de diagnóstico de distúrbios avalia a energia dos transitórios indiretamente pela análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet*, em uma escala predominantemente influenciada pelas componentes de alta frequência dos transitórios. A cada amostragem, a energia é calculada em tempo real, levando-se em consideração os últimos coeficientes *wavelet* em um ciclo (Δk). Além disto, o método utiliza as últimas Δk energias, armazenadas em um *buffer*, para avaliar estatisticamente o comportamento da amostra de energia calculada, com as anteriores. Portanto, em uma amostra k , o método de diagnóstico só avalia as últimas Δk amostras de energia.

Na análise em tempo real das energias, os distúrbios transitórios vão sendo detectados, em tempo de ocorrência, seguido pela sua classificação. O método proposto utiliza variáveis binárias de diagnóstico E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} , E_{pos} e E_{sag} , detalhadas mais adiante, que mudam de valor ao passo que os distúrbios vão surgindo e sendo eliminados. Essas variáveis formam os canais digitais de diagnóstico dos registros oscilográficos.

Na Figura 4.11 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) da falta monofásica da Figura 4.10. No período de pré-falta, em $k < k_{1E}$, as energias correspondem ao regime permanente do sistema e apresentam comportamento similar às energias dos registros sem distúrbios transitórios (energias sem grandes alterações nas amplitudes em um curto intervalo de tempo). No início de um PT, entretanto, percebe-se um aumento brusco de energia em, pelo menos, uma das curvas.

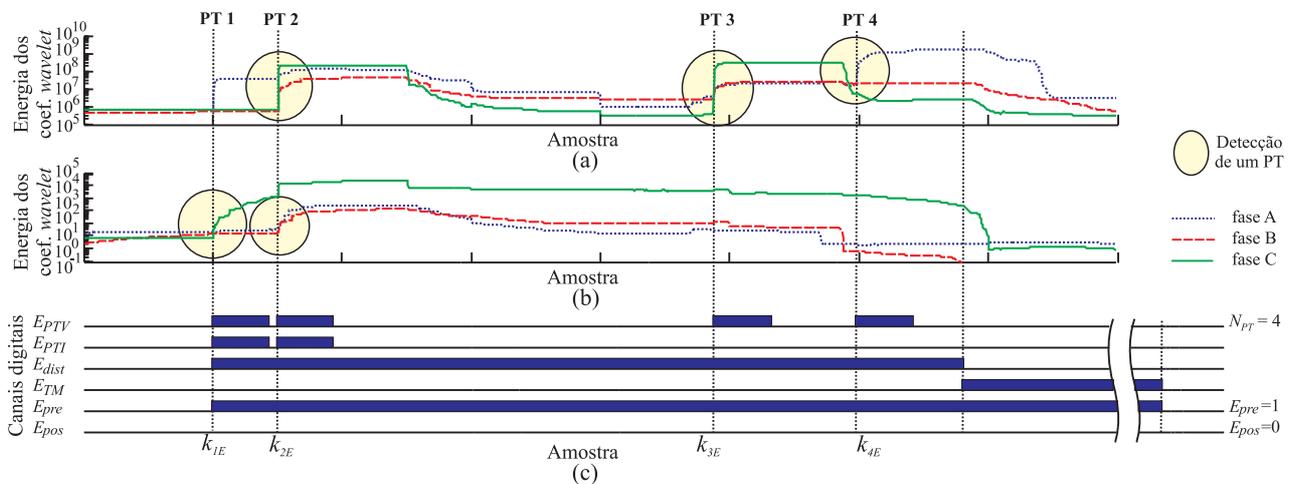


Figura 4.11. Registro oscilográfico com falta monofásica CT: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

Após o cálculo das energias na amostra k , o método avalia as cinco últimas amostras de \mathcal{E}_{v_A} para identificação de um PT. O mesmo procedimento é realizado nas outras energias, na sequência \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} . Um PT é detectado, caso a energia da amostra k apresente um aumento significativo em relação à energia da amostra $k-4$ (aumento brusco de energia). De modo geral, um aumento brusco de energia não ocorre instantaneamente, principalmente em registros com transitórios amortecidos. A análise pormenorizada das curvas de energia de registros com distúrbios transitórios indicou que a análise nas últimas cinco amostras de energia é suficiente para detecção de um PT (COSTA *et al.*, 2009b).

Na Figura 4.12 é apresentada a janela usada para o cálculo do aumento de energia em \mathcal{E}_{v_C} , que resultou na detecção do PT2 na amostra k_{2E} . Neste caso, a energia $\mathcal{E}_{v_C}(k_{2E})$ apresentou um aumento de aproximadamente 168 vezes a energia $\mathcal{E}_{v_C}(k_{2E}-4)$, ou seja

$$\frac{\mathcal{E}_{v_C}(k_{2E}) - \mathcal{E}_{v_C}(k_{2E} - 4)}{\mathcal{E}_{v_C}(k_{2E} - 4)} \approx 168. \quad (4.1)$$

Um aumento brusco é detectado na energia \mathcal{E} , em uma amostra k , caso o valor de energia da última amostra da janela seja no mínimo três vezes maior que o valor de energia da primeira amostra, como segue (COSTA *et al.*, 2009b)

$$\frac{\mathcal{E}(k) - \mathcal{E}(k - 4)}{\mathcal{E}(k - 4)} \geq 3, \quad (4.2)$$

ou seja

$$\mathcal{E}(k) \geq 4\mathcal{E}(k - 4), \quad (4.3)$$

sendo: $k > 4$; $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_{v_A}, \mathcal{E}_{v_B}, \mathcal{E}_{v_C}, \mathcal{E}_{i_A}, \mathcal{E}_{i_B} \text{ ou } \mathcal{E}_{i_C}\}$ e $\mathcal{E}(k - 4) \neq 0$.

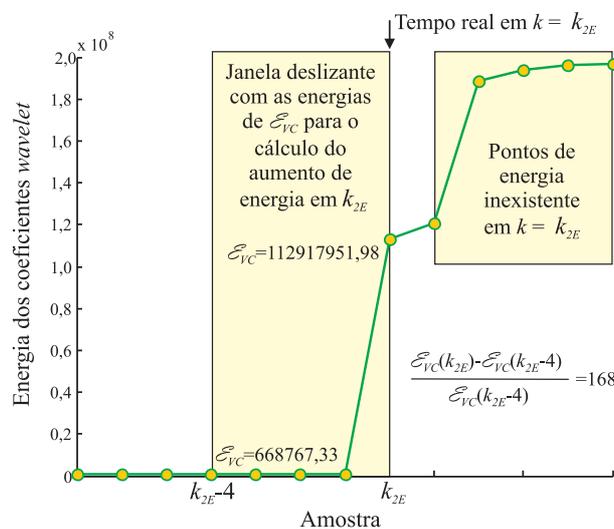


Figura 4.12. Aumento brusco de energia em \mathcal{E}_{v_C} , na amostra k_{2E} , relacionada ao PT2.

As variáveis binárias E_{PTV} e E_{PTI} indicam a detecção de um PT. O valor natural dessas variáveis é de nível lógico baixo ($E_{PTV}=0$ e $E_{PTI}=0$). Porém, sempre que um aumento brusco de energia em uma das curvas \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} ou \mathcal{E}_{v_C} é detectado, E_{PTV} assume nível lógico alto ($E_{PTV}=1$). O mesmo ocorre com o valor de E_{PTI} quando um aumento brusco de energia é detectado em \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} ou \mathcal{E}_{i_C} .

Quando um PT é detectado nas tensões, tem-se $E_{PTV}=1$ por um período de meio ciclo ($\Delta k/2$). Durante este período, a procura por outro aumento brusco de energia em \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} é interrompida até que se tenha novamente $E_{PTV}=0$, evitando-se a detecção de uma sequência de PTs referentes a uma única ocorrência. Entretanto, quando se tem $E_{PTV}=1$, a busca por um aumento brusco de energia em \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} é mantida. De um modo geral, $E_{PTV}=\uparrow$ e $E_{PTI}=\uparrow$ ocorrem em uma mesma amostra, sendo \uparrow a transição do nível lógico baixo para o alto. Porém, é comum que se tenha $E_{PTV}=\uparrow$ primeiro que E_{PTI} , ou vice-versa. Também é possível que um PT seja detectado apenas por E_{PTV} ou E_{PTI} . A ocorrência de $E_{PTV}=\uparrow$ e $E_{PTI}=\uparrow$ só fazem referência a um único PT quando isto ocorre em um período inferior a $\Delta k/2$.

O instante inicial de um PT é o instante da primeira transição \uparrow entre E_{PTV} e E_{PTI} , caso elas ocorram em um período inferior a meio ciclo. Após meio ciclo do instante inicial do PT, tem-se \downarrow (transição do nível lógico alto para o baixo) em ambas as variáveis lógicas E_{PTV} e E_{PTI} , ao mesmo tempo, caso ambas tenham detectados um aumento brusco de energia.

O i -ésimo PT, detectado nas curvas de energia, é referenciado pela amostra k_{iE} , identificado facilmente nos canais digitais quando $E_{PTV}=\uparrow$ ou $E_{PTI}=\uparrow$. Conforme se observa na Figura 4.11, os quatro PTs referentes aos instantes inicial e final da falta (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) foram detectados nas amostras k_{1E} , k_{2E} , k_{3E} e k_{4E} . Os dois primeiros PTs foram detectados por ambos E_{PTV} e E_{PTI} , enquanto que os dois últimos PTs foram detectados apenas por E_{PTV} .

Quando os PTs são detectados, é preciso identificá-los como pertencentes, ou não, a um único distúrbio, haja vista a possibilidade de ocorrência de múltiplos distúrbios transitórios no sistema de potência em um breve intervalo de tempo. O agrupamento de vários PTs de um distúrbio é feito, em tempo real, por meio da variável binária E_{dist} , que apresenta nível lógico baixo ($E_{dist}=0$) no regime permanente. Após a ocorrência do primeiro PT de um distúrbio ($E_{PTV}=\uparrow$ ou $E_{PTI}=\uparrow$, com $E_{dist}=0$), E_{dist} assume nível lógico alto ($E_{dist}=1$) por tempo indeterminado. Todos os PTs detectados enquanto $E_{dist}=1$ pertencem, então, a um único distúrbio.

Após a ocorrência de um distúrbio transitório, as energias tendem a voltar ao estado de regime permanente à medida que os transitórios vão sendo amortecidos. Quando isto ocorre, tem-se novamente $E_{dist}=0$. Para identificar o instante em que as energias voltam ao estado referente a uma nova situação de regime permanente, pós-distúrbio, o método leva em consideração que, no regime permanente, as energias apresentam uma variação mínima de amplitude. O instante em que as energias voltam ao estado de regime permanente é identificado quando:

$$\max(\mathcal{E}) < \mu + 3\sigma, \quad (4.4)$$

$$\min(\mathcal{E}) > \mu - 3\sigma, \quad (4.5)$$

sendo $\max(\cdot)$ o valor máximo; $\min(\cdot)$ o valor mínimo; μ e σ o valor médio e o desvio padrão de \mathcal{E} , calculados no intervalo $(k_{mE}-\Delta k, k_{mE})$, ou seja, em um ciclo precedente à detecção do distúrbio. As Inequações 4.4 e 4.5 têm que ser verificadas para todas as energias $\mathcal{E}=\{\mathcal{E}_{v_A}, \mathcal{E}_{v_B}, \mathcal{E}_{v_C}, \mathcal{E}_{i_A}, \mathcal{E}_{i_B}$ e $\mathcal{E}_{i_C}\}$. Além disto, as Inequações 4.4 e 4.5 são testada, ciclo a ciclo, dois ciclos após a detecção do último PT, ou seja, se k_{iE} for o último PT detectado, então o retorno das energias ao regime permanente é testado nas amostras $k=\{k_{iE}+2\Delta k, k_{iE}+3\Delta k, k_{iE}+4\Delta k, \dots\}$.

No caso de faltas e desligamentos, \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} não retornam a um novo estado de regime permanente, mas tendem a zero após atuação dos disjuntores para eliminação da falta ou desligamento da LT. Dependendo do ponto de monitoramento (linha ou barra), \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} ou \mathcal{E}_{v_C} também podem tender a zero após atuação dos disjuntores. Portanto, além das Inequações 4.4 e 4.5, o instante final de um distúrbio é identificado quando $\mathcal{E}=0$, ou seja, quando uma das energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} ou \mathcal{E}_{i_C} apresentar valor nulo. Ao contrário das Inequações 4.4 e 4.5, o teste para verificar se $\mathcal{E}=0$ é realizado, amostra por amostra, em tempo real, a partir do instante em que $E_{PTV}=\downarrow$ e $E_{PTI}=\downarrow$, ou seja, sempre que $E_{dist}=0$, $E_{PTV}=0$ e $E_{PTI}=0$.

Quando as Inequações 4.4 e 4.5 são verificadas, ou na confirmação de $\mathcal{E}=0$, a variável E_{TM} assume nível lógico alto durante 4 ciclos ($4\Delta k$) para se evitar a detecção de PTs, por exemplo, devido aos transitórios pós-falta nas tensões do secundário dos TPCs. Durante $E_{TM}=1$ (período de espera) as análises do método de detecção são interrompidas. Em $E_{TM}=\uparrow$, tem-se $E_{dist}=\downarrow$.

Quando as Inequações 4.4 e 4.5 são verificadas, ou na confirmação de $\mathcal{E}=0$, os próximos PTs são, então, associados a um novo distúrbio transitório. Na Figura 4.11, os PTs detectados nas amostras k_{1E} , k_{2E} , k_{3E} e k_{4E} pertencem a um único distúrbio (falta), visto que entre k_{1E} e k_{4E} tem-se $E_{dist}=1$. Neste caso, identificou-se $\mathcal{E}_{i_C}=0$ após k_{4E} .

O método de detecção usa as variáveis binárias E_{pre} e E_{pos} , que indicam as situações das energias antes e após os distúrbios. O valor de E_{pre} é calculado apenas na detecção do primeiro PT de um distúrbio ($E_{dist}=\uparrow$). Neste instante, se uma das energias médias de \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} ou \mathcal{E}_{i_C} em um ciclo precedente ao distúrbio for nula, então $E_{pre}=0$. Caso contrário, supõe-se que o sistema estava previamente em regime permanente, sendo $E_{pre}=1$.

O valor de E_{pos} é definido na transição $E_{dist}=\downarrow$. Caso E_{dist} mude do nível lógico alto para o baixo devido ao critério $\mathcal{E}=0$, tem-se $E_{pos}=0$. Caso contrário, tem-se $E_{pos}=1$. Portanto, em faltas tem-se $E_{pos}=0$, visto que as correntes são interrompidas por disjuntores.

Faltas e desligamentos de LTs apresentam $E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$. Porém, as faltas são caracterizadas por dois ou mais PTs ($N_{PT}\geq 2$), sendo $k_{nE}-k_{mE}>2\Delta k$, pois o tempo de detecção até a abertura dos disjuntores para extinção das faltas, por parte do sistema de proteção é, em geral, maior que dois ciclos (ANDERSON, 1999). Nesta tese, as amostras k_{mE} e k_{nE} se referem aos instantes do primeiro e último PT do distúrbio, respectivamente, identificados nas curvas de energia em $E_{PTV}=\uparrow$ ou $E_{PTI}=\uparrow$.

4.4 FALTAS EVOLUTIVAS

Falta evolutiva é uma falta que, com o tempo, envolve outras fases, anteriormente sãs. Por exemplo, uma falta monofásica que evolui para uma falta bifásica para terra (BOLLEN; GU, 2006). Além dos instantes inicial e final, o instante em que a falta muda de tipo também é caracterizado pela incidência de transitórios (BOLLEN; GU, 2006). Do ponto de vista dos transitórios, a principal diferença entre uma falta evolutiva e uma falta simples é a ocorrência de um novo PT no instante em que a falta muda de tipo.

Na Figura 4.13 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real com uma falta evolutiva (falta BT + BCT), destacando-se os transitórios nas diversas etapas da falta. As curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) desta falta são ilustradas na Figura 4.14, com destaque nas variações bruscas de energia correspondentes aos diversos PTs, nos instantes k_{1E} , k_{2E} , k_{3E} , k_{4E} e k_{5E} .

De acordo com a Figura 4.14, todos os PTs pertencem a um único distúrbio, visto que as energias não voltaram ao estado de regime permanente ($E_{dist}=1$), entre k_{1E} e k_{5E} . Neste caso, o distúrbio é classificado como falta, pois $E_{pre}=1$, $E_{pos}=0$ e $N_{PT}=5$, com $k_5-k_1 > 2\Delta k$.

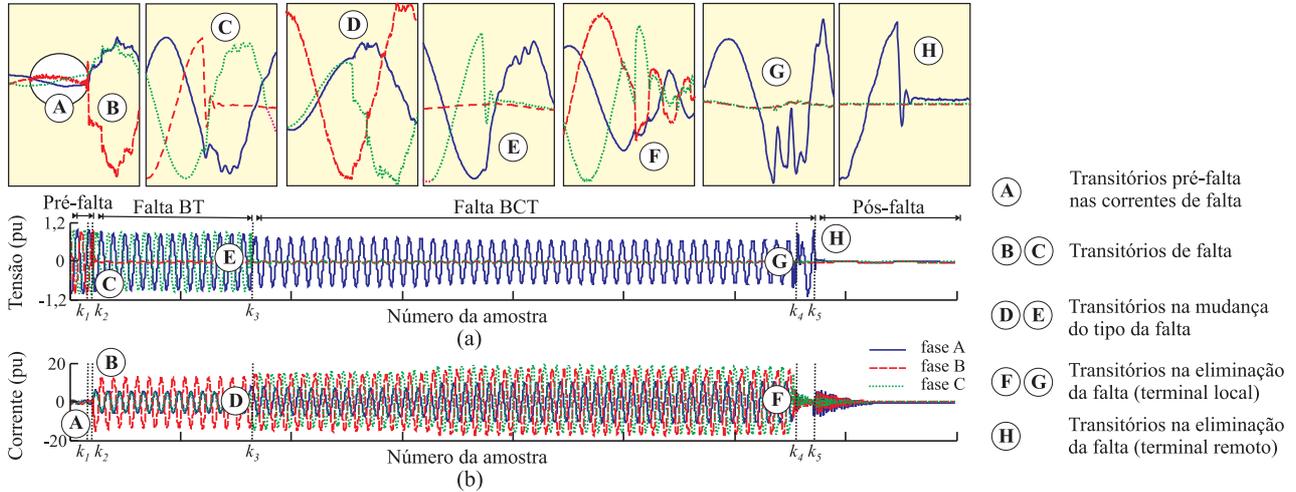


Figura 4.13. Registro real com falta evolutiva: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

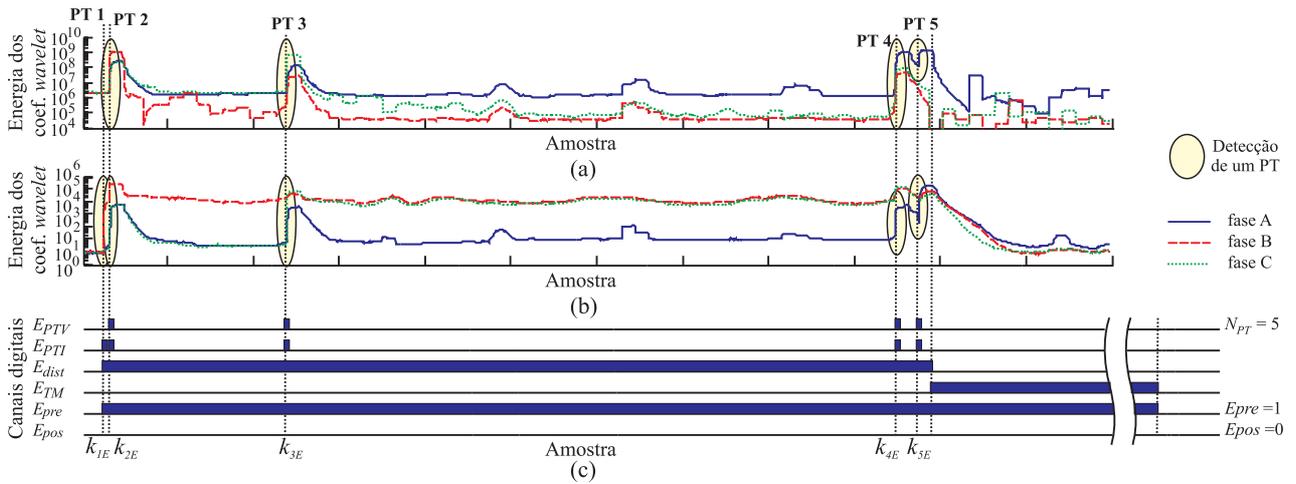


Figura 4.14. Energia janelada dos coeficientes *wavelet* da primeira escala de um registro real com falta evolutiva BT+BCT: (a) tensões; (b) correntes; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

4.5 AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Afundamentos de tensão são distúrbios típicos de QEE, sendo caracterizados 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. Nos sistemas de transmissão de energia elétrica, de modo geral, eles são decorrentes de faltas, mas também podem ser causados por chaveamentos de cargas pesadas (DUGAN *et al.*, 2003).

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

Parâmetros como amplitude e duração não caracterizam completamente um afundamento de tensão, haja vista a presença de fenômenos transitórios em seus instantes inicial e final, resultantes da ocorrência e eliminação de faltas (BOLLEN, 2000; BOLLEN; GU, 2006). Na Figura 4.15 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real com afundamento de tensão na fase B, originadas pela falta da Figura 4.10, destacando-se os PTs nas tensões e correntes imediatamente após os instantes k_1 , k_2 , k_3 e k_4 , correspondentes aos instantes inicial e final da falta.

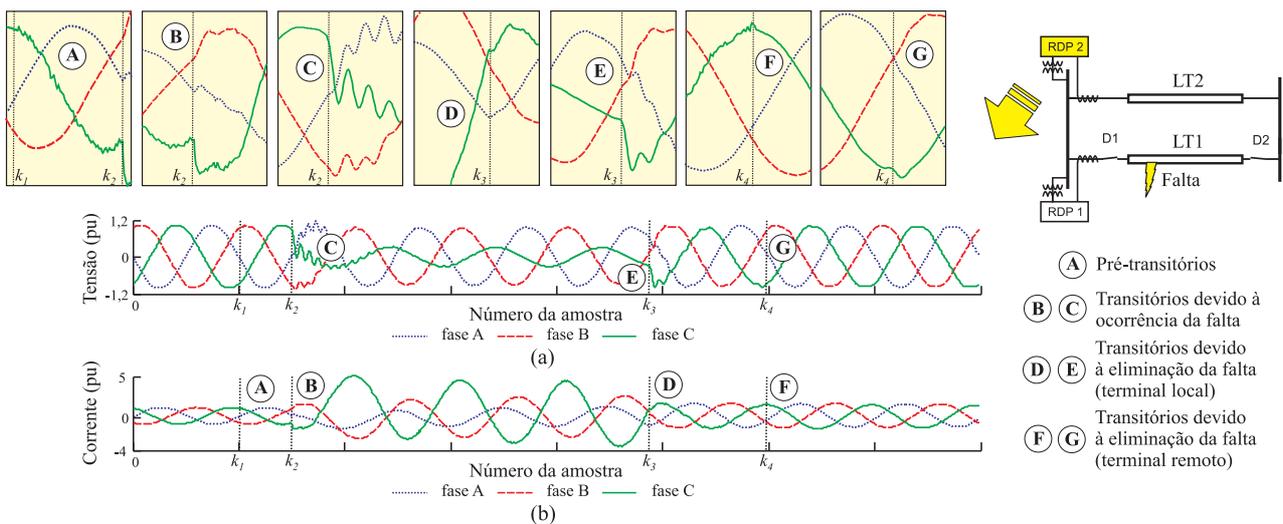


Figura 4.15. Registro oscilográfico real com afundamento de tensão na fase C: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

As principais características dos fenômenos transitórios observadas no afundamento de tensão da Figura 4.15 são apresentadas a seguir:

1. Pré-transitórios

Algumas correntes antes da ocorrência do afundamento de tensão podem apresentar oscilações de alta frequência (pré-transitórios) devido aos transitórios pré-falta. Na Figura 4.15 destacam-se os pré-transitórios em i_C , antes da ocorrência do afundamento da

tensão em v_C , devido aos transitórios pré-falta da corrente de falta i_C da Figura 4.10. Em taxas de amostragem alta, os pré-transitórios podem influenciar consideravelmente os coeficientes *wavelet* da primeira escala, dificultando a identificação precisa do instante inicial do distúrbio.

2. Transitórios devido à ocorrência da falta

Além da diminuição do valor RMS da tensão, o instante inicial de um afundamento de tensão é caracterizado pela ocorrência de transitórios nas tensões e correntes devido à ocorrência da falta em uma outra LT (BOLLEN, 2000; BOLLEN; GU, 2006).

3. Transitórios devido à eliminação da falta (terminais local e remoto)

O instante final de um afundamento de tensão também é caracterizado pela ocorrência de transitórios nas tensões e correntes devido ao chaveamento nos disjuntores para eliminação da falta (BOLLEN, 2000; BOLLEN; GU, 2006). Os transitórios devido a manobra de chaveamento no terminal remoto tendem a ser mais amortecidos. Este fato pode ser observado na Figura 4.15, em que os transitórios em k_4 são mais amortecidos que os transitórios em k_3 .

Na Figura 4.16 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do afundamento de tensão da Figura 4.15, destacando-se as variações bruscas de energia correspondentes aos diversos PTs (k_{1E} , k_{2E} , k_{3E} e k_{4E}). As curvas de energia referentes a um afundamento de tensão devido a uma falta em outra LT apresentam as mesmas características da falta, com exceção de $E_{pos}=1$, visto que as correntes voltam ao regime permanente após eliminação bem sucedida da falta.

Os PTs relacionados ao instante inicial do distúrbio foram detectados corretamente em $k_{1E} \approx k_1$ e $k_{2E} \approx k_2$. Transitórios durante o afundamento de tensão foram detectados em k_{3E} . Com relação ao instante final do distúrbio, apenas o PT relacionado ao chaveamento local foi detectado, em $k_{4E} \approx k_3$. No entanto, não se tem afundamento na tensão entre k_3 e k_4 (Figura 4.15). Todos os PTs detectados pertencem a um único distúrbio, visto que $E_{dist}=1$ entre k_{1E} e k_{4E} .

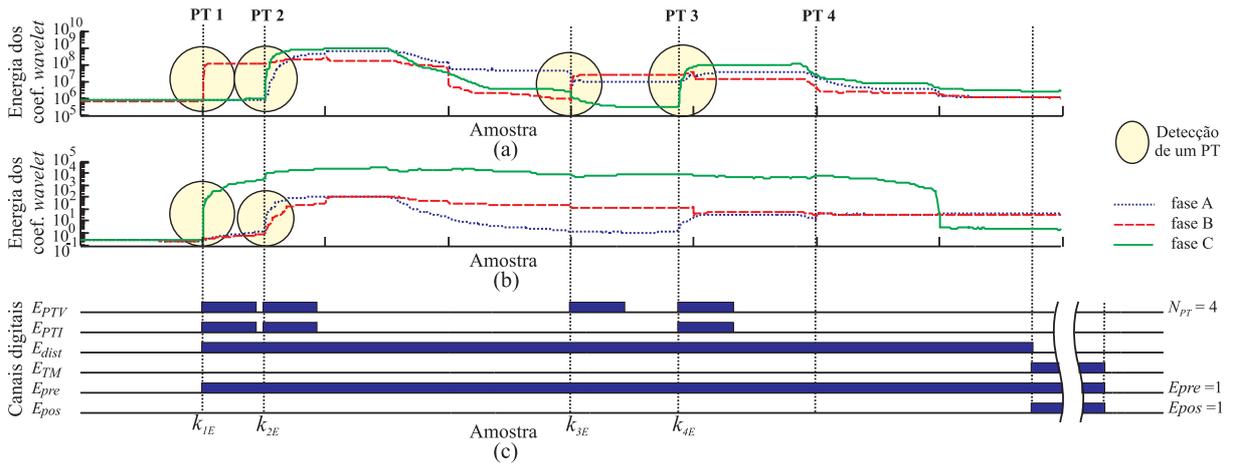


Figura 4.16. Registro oscilográfico com afundamento de tensão na fase C: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

As faltas e os afundamentos de tensão devido às faltas em outras linhas são diferenciados pela variável E_{pos} . Porém, outros distúrbios, tais como transitórios de chaveamento, também podem apresentar os valores $N_{PT} \geq 1$, $E_{pre} = 1$ e $E_{pos} = 1$, típicos de afundamentos de tensão. Por isso, o método de detecção utiliza mais uma variável binária para confirmação, em tempo real, dos afundamentos de tensão, denominada E_{sag} .

Como visto no Capítulo 3, os coeficientes *wavelet* da primeira escala em sinais com taxa de amostragem típicas de RDPs estão relacionados às componentes de alta frequência dos transitórios do sinal, enquanto que os coeficientes de aproximação são predominantemente influenciados pela componente fundamental. Como durante o afundamento de tensão o valor RMS da tensão é reduzido do valor RMS do regime permanente, então se espera que a energia dos coeficientes de aproximação das tensões de fase ($\ddot{\mathcal{E}}_{v_A}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{v_B}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{v_C}$) na primeira escala também seja reduzida da energia no regime permanente. Na Figura 4.17 são ilustradas as tensões de fase do registro da Figura 4.15, as respectivas energias dos coeficientes de aproximação normalizadas com a energia média em um ciclo antes do distúrbio e as variáveis binárias de diagnóstico.

A variável E_{sag} possui nível lógico baixo. Porém, durante o distúrbio ($E_{dist} = 1$), se o valor de energia dos coeficientes de aproximação de uma das tensões $\ddot{\mathcal{E}}_{v_A}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{v_B}$ ou $\ddot{\mathcal{E}}_{v_C}$ apresentar valor inferior a 0,9 do valor médio da respectiva energia em um ciclo antes do distúrbio (\ddot{E}_{v_A} , \ddot{E}_{v_B} e \ddot{E}_{v_C}), então o valor de E_{sag} na amostra avaliada, em tempo real, assume nível lógico alto ($E_{sag} = 1$). Ao final da detecção do distúrbio, em $E_{TM} = \downarrow$, se $E_{pre} = 1$, $E_{pos} = 1$ e $N_{PT} \geq 2$, com $k_{mE} - k_{nE} \geq 2\Delta k$, então o distúrbio corresponde a um afundamento de tensão se $E_{sag} = 1$ por mais de meio ciclo.

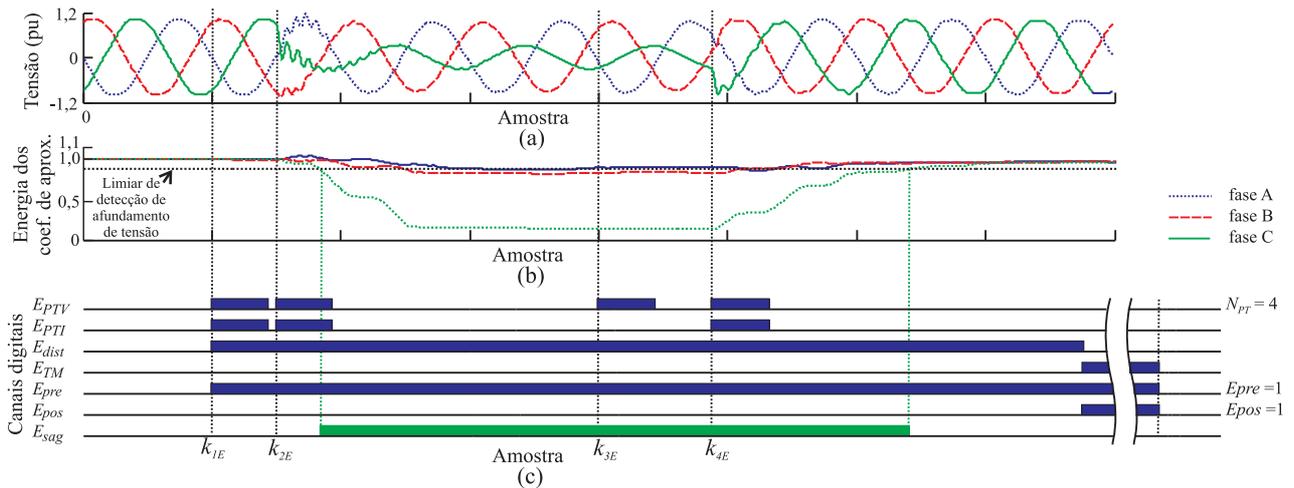


Figura 4.17. Registro oscilográfico com afundamento de tensão na fase C: (a) tensões de fase; (b) energia dos coeficientes de aproximação normalizadas; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

4.6 ENERGIZAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A energização de uma LT é uma manobra de chaveamento típica em sistemas de potência, sendo efetuada por disjuntores com o fechamento dos seus contatos. Na Figura 4.18 é ilustrado um sistema elétrico fictício, representado por duas LTs (LT1 e LT2), sendo uma delas com os terminais em aberto. A energização dos terminais da LT1 pode ser realizada pelo disjuntor D1, seguido do disjuntor D2 (Figura 4.19). Os dispositivos de monitoramento RDP1, RDP2 e RDP3 são utilizados para registrar as diversas ocorrências neste sistema.

Nesta tese, denomina-se energização, o distúrbio transitório devido à energização de uma LT, cujo terminal monitorado corresponde ao terminal energizado. Por exemplo, durante o fechamento do disjuntor D1 da Figura 4.18, tem-se uma energização no registro obtido pelo RDP1. Por outro lado, denominam-se transitórios de chaveamento, os distúrbios nos registros obtidos pelos RDPs localizados nos demais pontos do sistema (RDP2 e RDP3). Em seguida, durante o fechamento do disjuntor D2 (Figura 4.19), tem-se uma energização no registro obtido pelo RDP2 e transitórios de chaveamento nos registros obtidos pelos RDP1 e RDP3 (COSTA *et al.*, 2008c; COSTA *et al.*, 2009b).

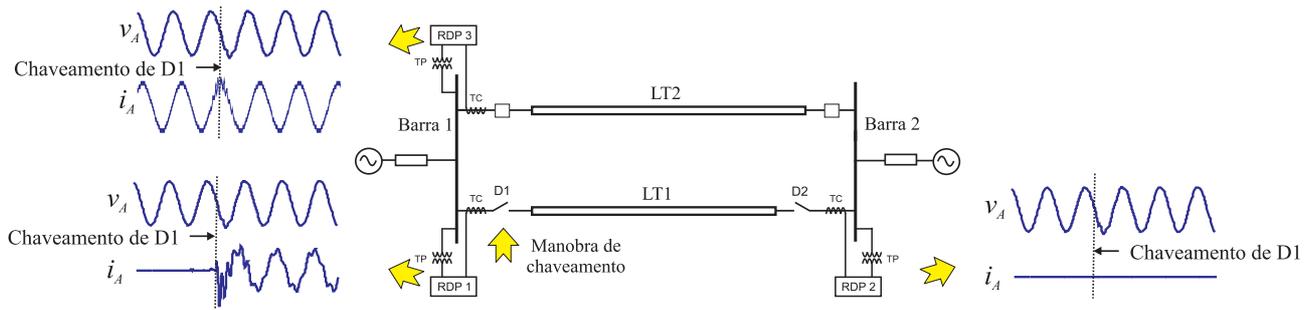


Figura 4.18. Energização de uma LT com o terminal remoto em aberto.

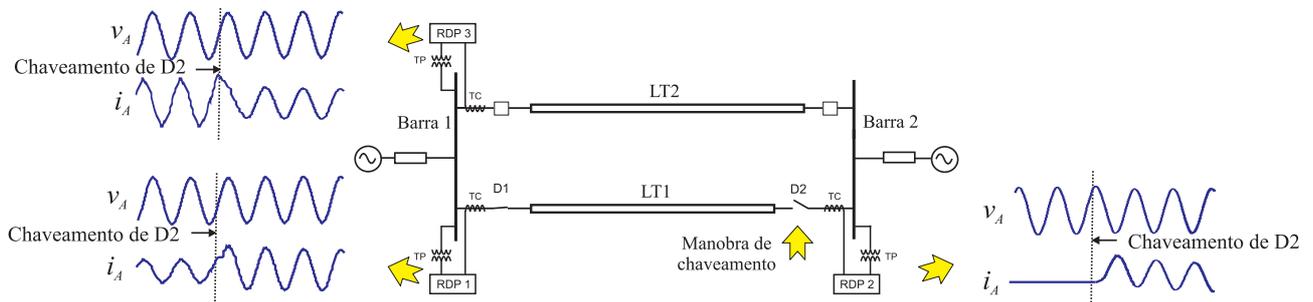


Figura 4.19. Energização de uma LT com o terminal remoto fechado.

4.6.1 Energização de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto em Aberto

Na Figura 4.20 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real, obtido durante uma manobra de energização de uma LT com o terminal remoto em aberto e RDP localizado no terminal energizado.

Quando um disjuntor é solicitado a executar uma operação de energização, seus pólos se aproximam mecanicamente. Antes do acoplamento físico, a corrente começa a fluir por meio do pré-arco que se estabelece entre os pólos. Deste instante em diante, tem-se a ocorrência de transitórios nas tensões e correntes no terminal energizado e, após alguns ciclos, o sistema entra em regime permanente (D'AJUZ *et al.*, 1987). Os fenômenos transitórios resultantes de manobras de energização dependem das diversas condições do sistema, entre as quais destacam-se o comprimento da LT, a presença de resistores de pré-inserção, o ponto na onda de tensão em que o disjuntor é fechado e a dispersão entre os contatos do disjuntor (D'AJUZ *et al.*, 1987). Os transitórios decorrentes da manobra de energização de uma LT, ilustrados na Figura 4.20, são descritos a seguir:

1. No instante t_1 , ocorrem pequenas perturbações, denominadas pré-transitórios, antes do acoplamento físico dos contatos do disjuntor da LT. Estes pré-transitórios também são denominados PTs.
2. Aproximadamente 10 ms após t_1 , iniciou-se o arco elétrico entre os terminais do disjuntor na fase C, no instante t_{2c} , seguido imediatamente pelo contato mecânico. Nos instantes t_{2b} e t_{2a} , os contatos das fases B e A se fecharam, respectivamente.

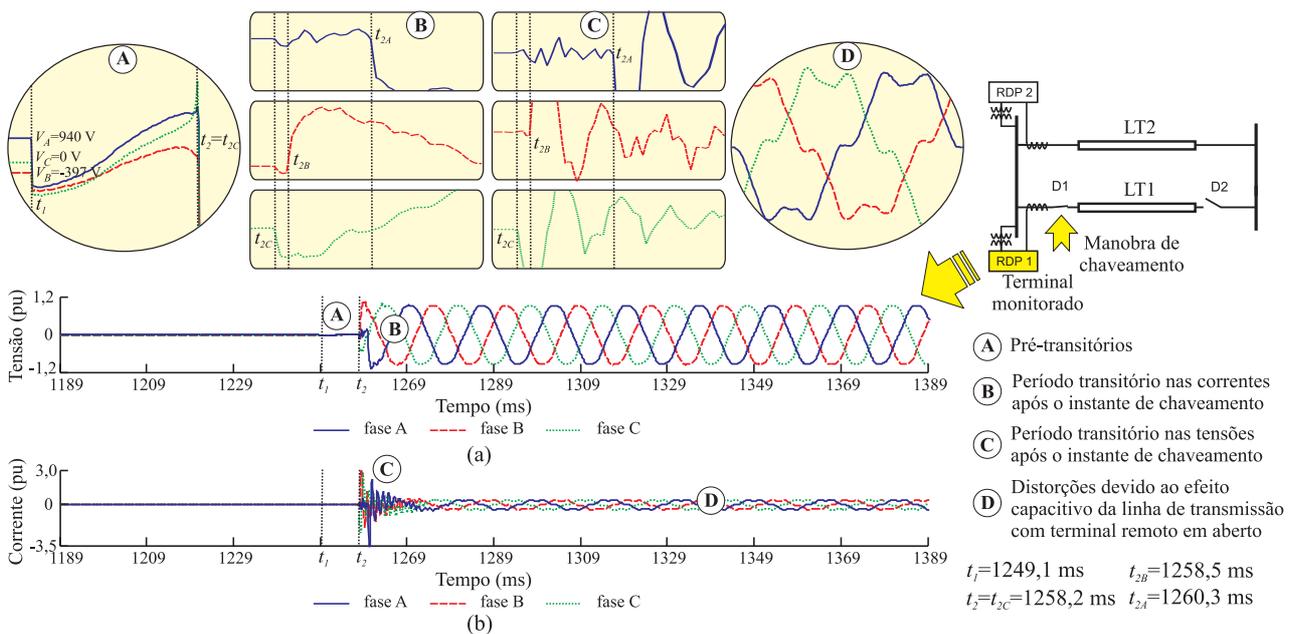


Figura 4.20. Energização de uma linha de transmissão com um terminal em aberto, com monitoramento do terminal energizado: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

Na prática, em um sistema trifásico, os três pólos do disjuntor não fecham simultaneamente, pois existe uma dispersão mecânica dos contatos da ordem de 2 ms. Além disso, não se sabe em qual pólo haverá o primeiro contato mecânico, pois o arco elétrico que se estabelece antes do contato mecânico em cada pólo é aleatório (ZANETA Jr., 2003).

Devido ao acoplamento eletromagnético entre as fases do sistema trifásico, após o fechamento dos contatos da fase C do disjuntor, no instante t_{1c} , as tensões e correntes das fases B e A da LT apresentaram transitórios induzidos, mesmo antes do fechamento dos respectivos pólos, nos instantes t_{1b} e t_{1a} (Figura 4.20). O PT de tal manobra corresponde ao instante inicial dos transitórios, ocorridos devido à passagem da corrente na formação do arco elétrico no fechamento do primeiro pólo do disjuntor. Neste caso, tem-se o PT no instante $t_2 = t_{2c}$.

Após os transitórios, com duração de poucos ciclos a partir de t_2 , o sistema entra em regime permanente. Neste caso, as correntes são caracterizadas por distorções geradas por múltiplas reflexões de ondas, no terminal em aberto. Além do mais, devido ao efeito capacitivo da LT em aberto, a defasagem entre as tensões e as respectivas correntes de fase é de aproximadamente 90° . Destacam-se na Figura 4.20, um trecho das correntes de fase no regime permanente, após a energização do terminal da LT.

As curvas de energia referentes a uma energização são caracterizadas por apresentar $N_{PT}=1$, $E_{pre}=0$ e $E_{pos}=1$. Quando os pré-transitórios são detectados ou quando se tem a utilização de resistores de pré-inserção, tem-se $N_{PT}>1$, geralmente com $k_{nE}-k_{mE}<2\Delta k$.

Na Figura 4.21 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) a as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com energização da Figura 4.20. Os dois PTs foram identificados por aumentos bruscos de energia nos instantes k_{1E} e k_{2E} . Esses PTs pertencem a um único distúrbio, visto que $E_{dist}=1$ entre k_{1E} e k_{2E} . Após k_{2E} , as energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} voltaram ao estado de regime permanente na transição $k_{dist}=\downarrow$. O distúrbio foi classificado como energização, visto que $E_{pre}=0$ e $E_{pos}=1$. Neste caso, $N_{PT}=2$, com $k_{2E}-k_{1E}<2\Delta k$.

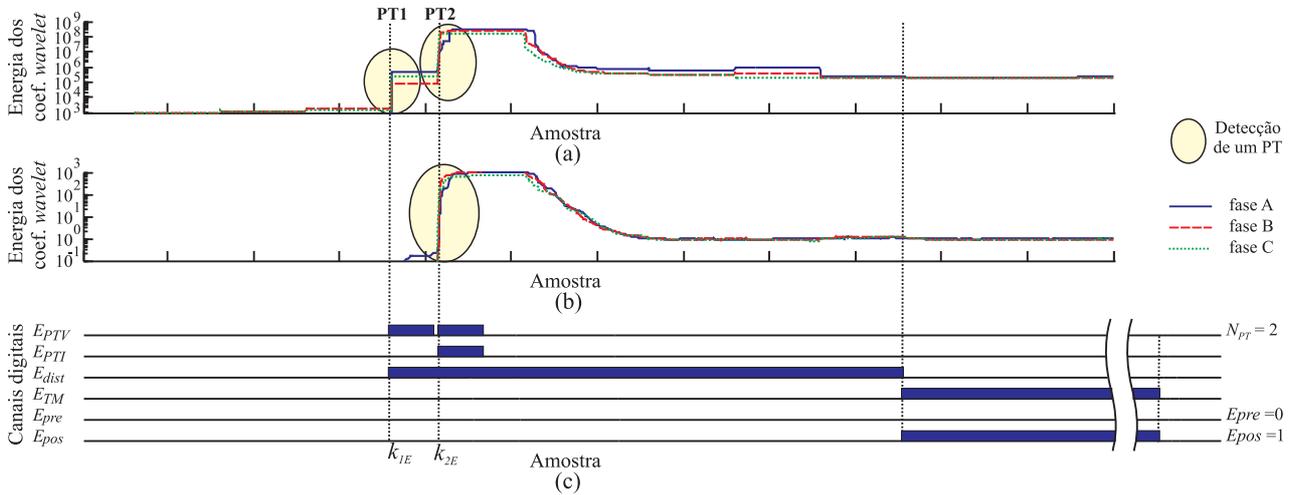


Figura 4.21. Energização de uma linha de transmissão com o terminal remoto em aberto, com monitoramento do terminal energizado: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

Na Figura 4.22 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real, cujos transitórios foram ocasionados pela energização de uma LT em paralelo, com o terminal remoto em aberto, ilustrado na Figura 4.20. O registro oscilográfico é composto por pré-transitórios, no instante t_1 , e transitórios devido ao chaveamento (energização da LT em paralelo), no instante t_2 . Os instantes de ocorrência dos transitórios das Figuras 4.20 e 4.22 podem ser comparados, visto que eles se referem a uma única manobra de chaveamento.

As curvas de energia referentes aos transitórios de chaveamento são caracterizadas por apresentarem $E_{pre}=1$, $E_{pos}=1$ e $E_{sag}=0$ durante $E_{dist}=1$. Geralmente, tem-se $N_{PT}=1$. Porém, quando os pré-transitórios são detectados, tem-se $N_{PT}=2$, com $k_{nE}-k_{mE}<2\Delta k$.

Na Figura 4.23 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} , E_{pos} e E_{sag}) do registro com transitórios de chaveamento da Figura 4.22. Todos os PTs foram identificados por aumentos bruscos de energia, em k_{1E} e k_{2E} . Após k_{2E} , as energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} voltaram ao estado de regime permanente, quando $E_{dist}=\downarrow$. O distúrbio foi classificado como transitórios de chaveamento, visto que $E_{pre}=1$, $E_{pos}=1$ e $E_{sag}=0$ durante $E_{dist}=1$. Neste caso, $nPT=2$, com $k_{2E}-k_{1E}<2\Delta k$

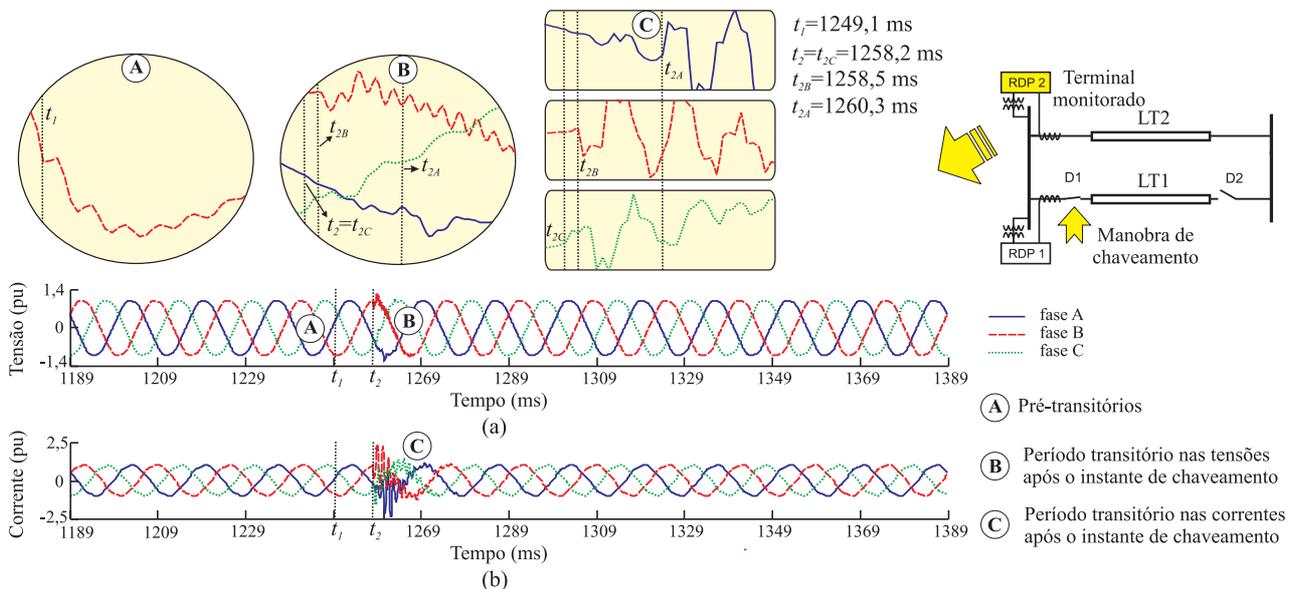


Figura 4.22. Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pela energização de uma outra linha de transmissão do sistema elétrico: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

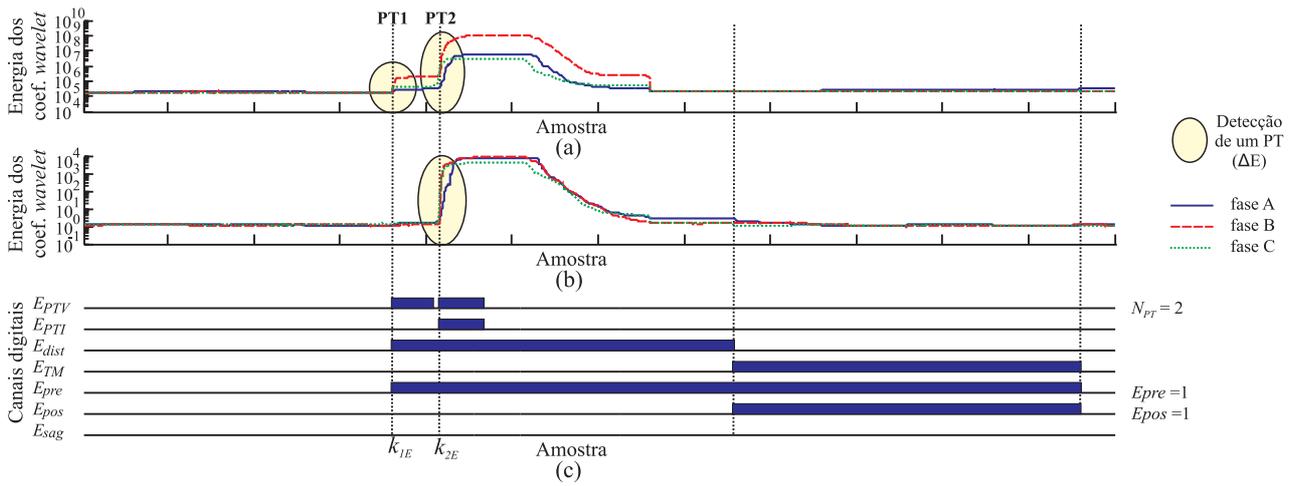


Figura 4.23. Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pela energização de uma outra linha de transmissão do sistema elétrico: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

Na Figura 4.24 são ilustradas as tensões e correntes de um registro oscilográfico real com transitórios de chaveamento, referentes à energização de uma LT com o terminal remoto em aberto¹, cujo ponto de monitoramento foi o terminal remoto. Esse registro oscilográfico não é referente à energização da LT que resultou nos registros das Figuras 4.20 e 4.22.

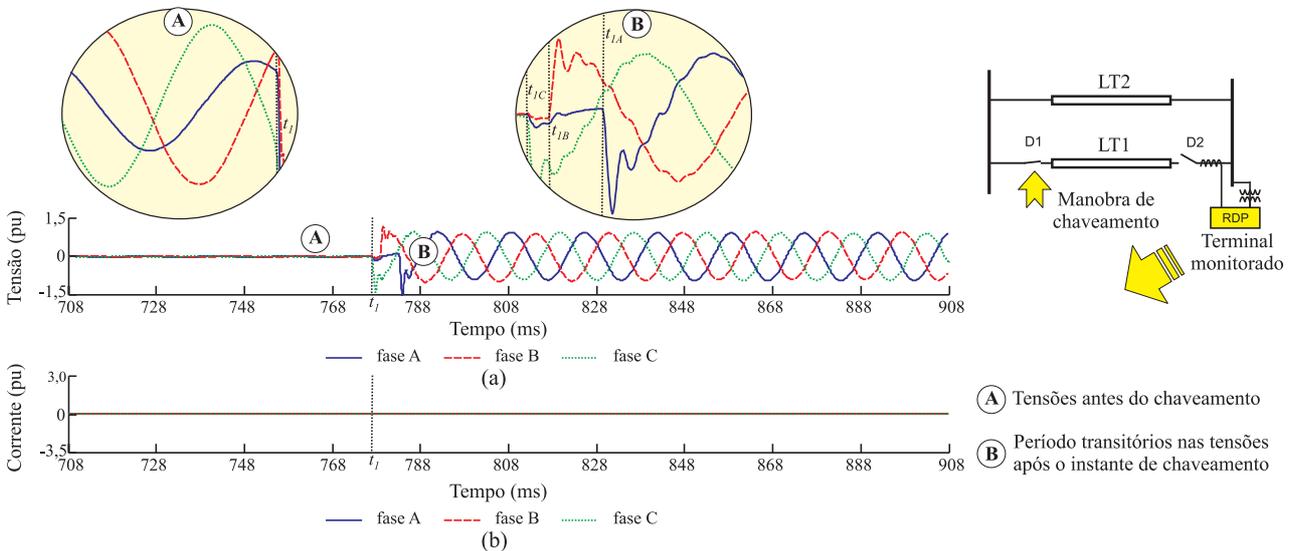


Figura 4.24. Energização de uma linha de transmissão com um terminal em aberto, com monitoramento no terminal remoto: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

¹Terminal local é o terminal da LT na qual é realizada uma manobra de energização ou desligamento, sendo o outro terminal denominado terminal remoto.

Da teoria de propagação de ondas em LTs, 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 (ARAUJO; NEVES, 2005). Portanto, as correntes no terminal em aberto da LT devem ser nulas (Figura 4.24), 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 a duplicação das tensões incidentes no terminal. Na prática, devido às perdas existentes na LT, o valor das tensões no terminal em aberto não é o dobro daquele obtido no terminal energizado.

Conforme ilustrado na Figura 4.24, antes da manobra de energização da LT, os valores das tensões não são zero no terminal monitorado. Na prática, os valores de pico das tensões podem atingir algumas dezenas de kilo volts devido ao acoplamento eletromagnético com LTs em paralelo (D'AJUZ *et al.*, 1987).

As curvas de energia referentes aos transitórios de chaveamento, neste caso particular, são caracterizadas por apresentar $E_{pre}=0$ e $E_{pos}=0$, geralmente com $N_{PT}=1$. Além disto, os PTs são detectados apenas por E_{PTV} . Na Figura 4.25 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com transitórios de chaveamento da Figura 4.24.

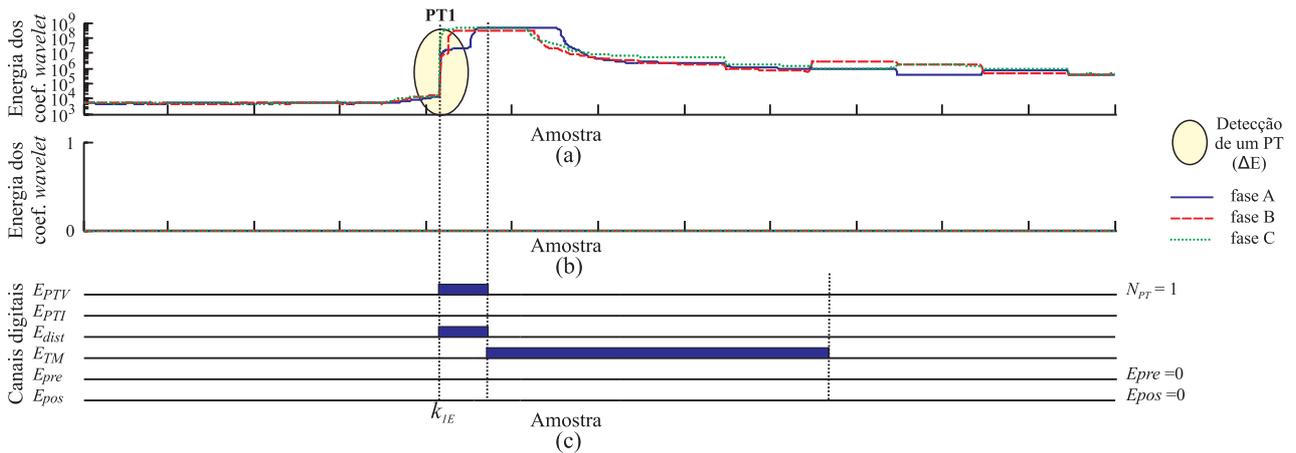


Figura 4.25. Energização de uma linha de transmissão com um terminal em aberto, com monitoramento no terminal remoto: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

De acordo com a Figura 4.25, o PT devido à manobra de chaveamento foi identificado por aumentos bruscos de energia em \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} , na amostra k_{1E} . Meio ciclo após k_{1E} , constatou-se que \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} eram nulas. Conseqüentemente, tem-se $E_{dist}=\downarrow$, seguido por um período de espera de 4 ciclos. Ao final, o distúrbio foi classificado como transitórios de chaveamento, visto que $N_{PT}=1$, $E_{pre}=0$, $E_{pos}=0$ e apenas $E_{PTV}=\uparrow\downarrow$.

4.6.2 Energização de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto Fechado

Na Figura 4.26 são ilustradas as tensões e correntes de fase referentes à energização real de uma LT com o terminal remoto fechado, cujo ponto de monitoramento foi o terminal local. Neste caso, as correntes são nulas durante os primeiros ciclos, pois toda onda de corrente incidente no terminal em aberto é refletida com sinal invertido. Após alguns ciclos da manobra de energização, as correntes assumiram seus valores de regime permanente, conforme a carga alimentada. As energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} apresentam as mesmas características das energias ilustradas na Figura 4.21.

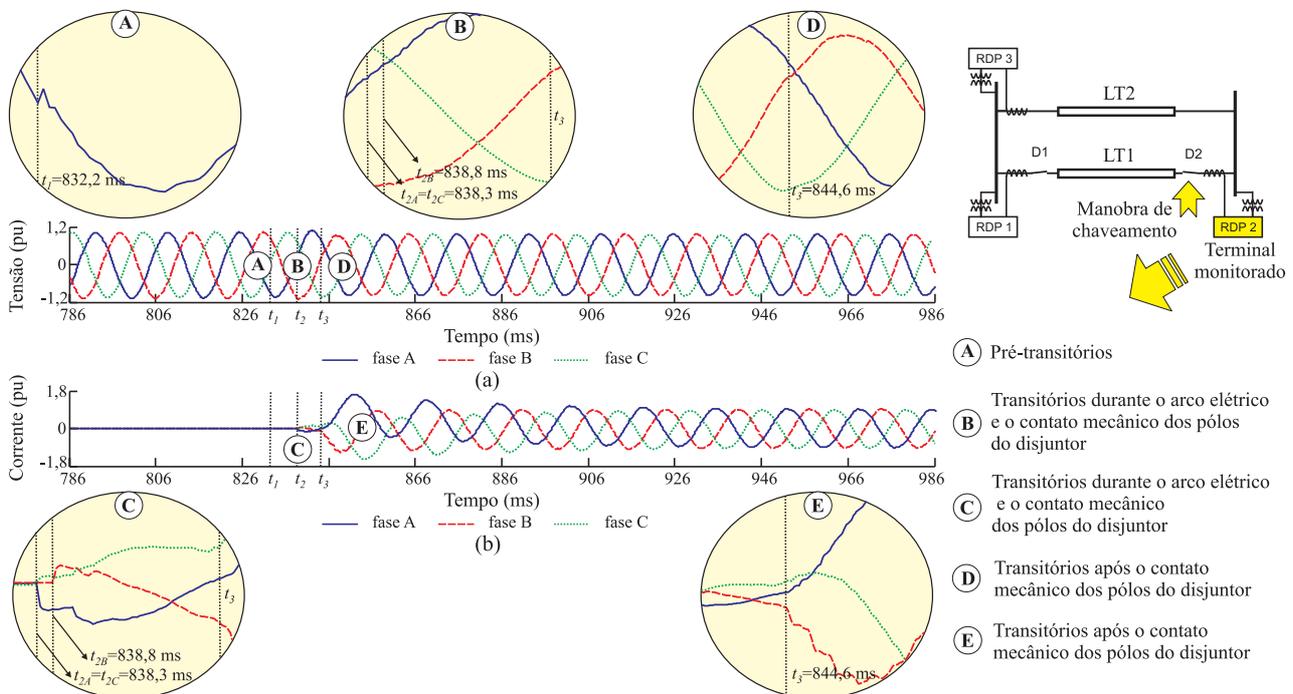


Figura 4.26. Energização de uma linha de transmissão com o terminal remoto fechado e monitoramento no terminal local: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

Na Figura 4.27 são apresentadas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real referentes à manobra de energização que resultou no oscilograma da Figura 4.26. Neste caso, entretanto, o ponto de monitoramento foi o terminal remoto e as correntes são capacitivas durante os primeiros ciclos, visto que a LT possui um terminal em aberto. Apenas alguns ciclos após a energização do terminal em aberto, as correntes assumem seus valores de regime permanente, conforme a carga alimentada.

Na Figura 4.28 são ilustradas as tensões e correntes de fase em uma LT, cujos transitórios foram ocasionados pela energização em uma outra LT (Figuras 4.26 e 4.27). Devido ao acoplamento elétrico do sistema de potência, observam-se os pré-transitórios em t_1 e os transitórios em t_2 , levando-se em consideração o tempo de trânsito das ondas eletromagnéticas da LT.

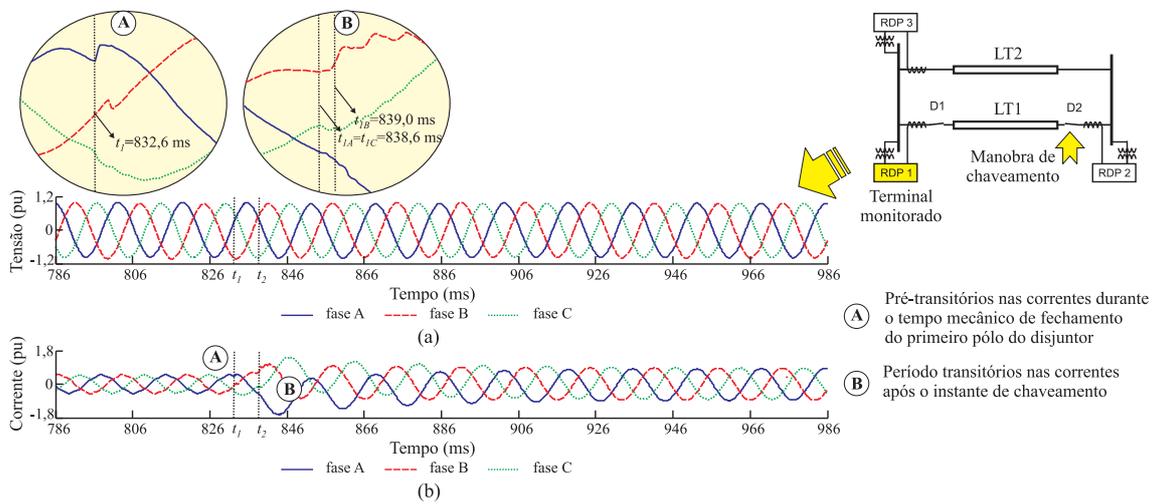


Figura 4.27. Energização de uma linha de transmissão com um terminal remoto fechado e monitoramento no terminal remoto: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

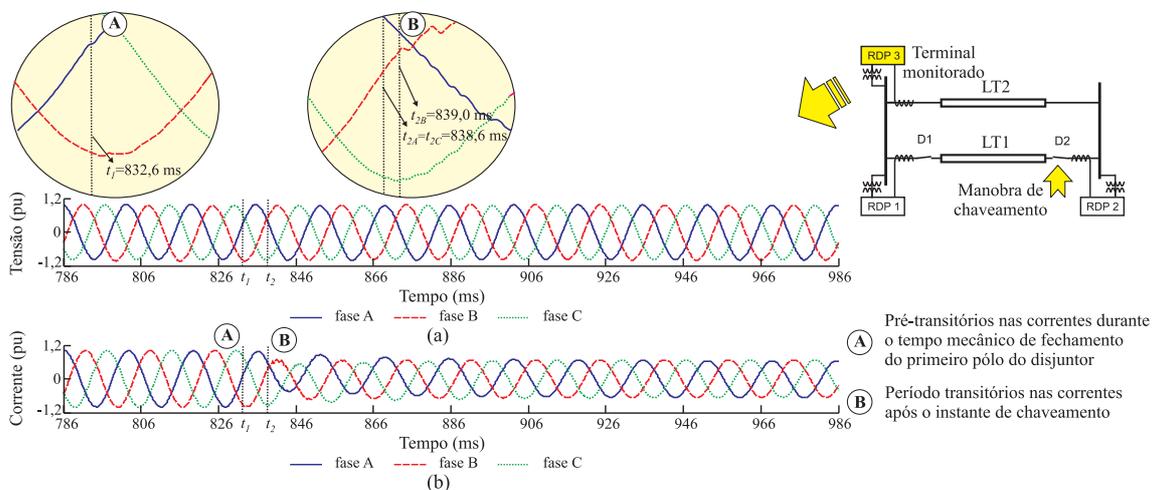


Figura 4.28. Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pela energização de uma outra linha de transmissão: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

As energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} dos registros das Figuras 4.27 e 4.28 apresentam as mesmas características das energias ilustradas na Figura 4.23.

4.7 DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O desligamento de uma LT é uma operação de chaveamento típica efetuada por disjuntores, por meio da abertura dos seus contatos. Da mesma forma que as energizações em LTs, diversos registros oscilográficos podem ser obtidos mediante manobras de desligamento, a depender do terminal a ser aberto por um disjuntor e do terminal a ser monitorado por um RDP (COSTA *et al.*, 2008c; COSTA *et al.*, 2009b). Nesta tese, denomina-se desligamento, o distúrbio transitório devido ao desligamento de uma LT, cujo terminal monitorado corresponde ao terminal deenergizado. Por outro lado, denominam-se transitórios de chaveamento, os distúrbios nos registros obtidos pelos RDPs localizados nos demais pontos do sistema, durante a manobra de desligamento de uma LT.

4.7.1 Desligamento de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto Fechado

Na Figura 4.29 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real, referente a uma manobra de desligamento de uma LT, com o terminal remoto fechado, cujo ponto de monitoramento foi o terminal local.

Durante os primeiros ciclos, antes da manobra de chaveamento, as tensões e correntes estavam em regime permanente conforme a carga alimentada. No entanto, houve a ocorrência de transitórios nas tensões e correntes no instante correspondente à ocorrência do arco elétrico, em t_1 , quando iniciou-se o desacoplamento mecânico entre os pólos do disjuntor. Nesta tese, os transitórios ocorridos em t_1 também são denominados pré-transitórios. Aproximadamente após 11 ms de t_1 , as correntes foram interrompidas e houve novamente a ocorrência de transitórios nas tensões. Neste registro, a corrente na fase B foi a primeira a ser interrompida, seguida pelas correntes nas fase A e C, respectivamente. De um modo geral, os transitórios devido aos desligamentos não são severos.

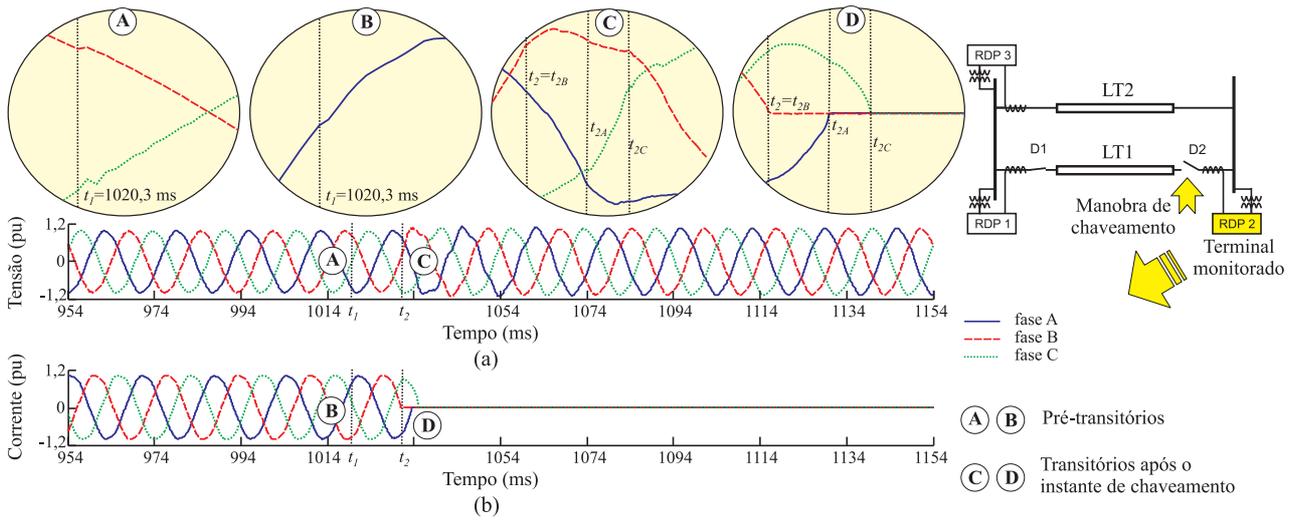


Figura 4.29. Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal local: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

As curvas de energia referentes aos desligamentos são caracterizadas por apresentarem $E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$, com $N_{PT}=1$. Quando os pré-transitórios são detectados, tem-se $N_{PT}=2$, geralmente com $k_{nE}-k_{mE}<2\Delta k$. Na Figura 4.30 são apresentadas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com desligamento da Figura 4.29, destacando-se as variações brusca de energia nos PTs em k_{1E} e k_{2E} .

Do mesmo modo que em uma falta, quando a corrente é interrompida por um disjuntor na sua passagem por zero, a corrente do secundário do TC normalmente tem um valor positivo ou negativo. Como consequência, as correntes após o desligamento da LT apresentam um decaimento exponencial e com pequenas oscilações (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1982). Esses ruídos podem influenciar o cálculo de \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} , cujos valores deveriam ser zero, imediatamente após o desligamento. Conforme ilustrado na Figura 4.30, \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} tenderam a zero após k_{2E} .

Na Figura 4.31 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real com transitórios devido ao desligamento de uma outra LT do sistema, cujo oscilograma foi apresentado na Figura 4.29. Devido ao acoplamento elétrico do sistema de potência, os pré-transitórios e os transitórios devido à manobra de chaveamento da outra LT estão presentes no registro oscilográfico da Figura 4.31. De uma maneira geral, os transitórios nestes registros são bastante amortecidos.

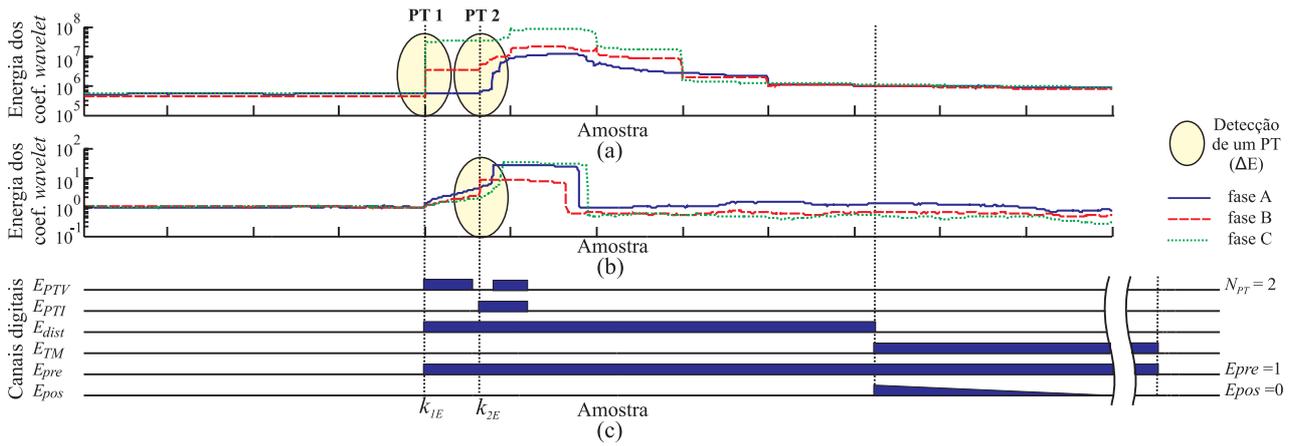


Figura 4.30. Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal local: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

Na Figura 4.32 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com transitórios de chaveamento da Figura 4.31, destacando-se as variações brusca de energia nos PTs em k_{1E} e k_{2E} . Todos os PTs pertencem a um único distúrbio, visto que $E_{dist}=1$ entre k_{1E} e k_{2E} . Após k_{2E} , as energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} voltaram ao estado de regime permanente quando $E_{dist}=\downarrow$. Por fim, o distúrbio foi classificado como transitórios de chaveamento, visto que $N_{PT}=2$, $k_{2E}-k_{1E}<2\Delta k$, $E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$.

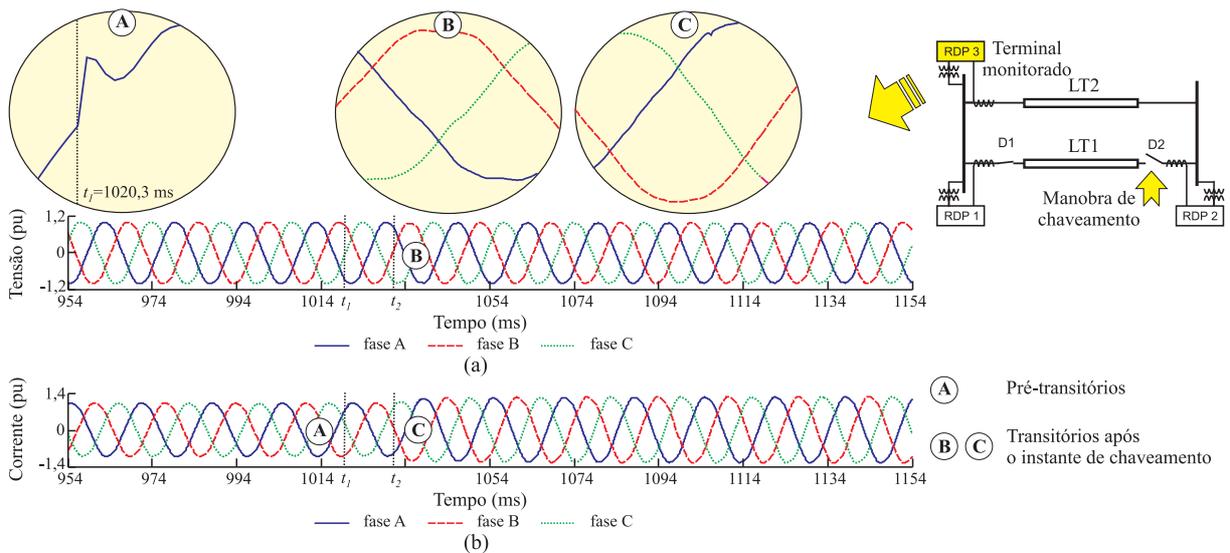


Figura 4.31. Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pelo desligamento de outra linha de transmissão: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

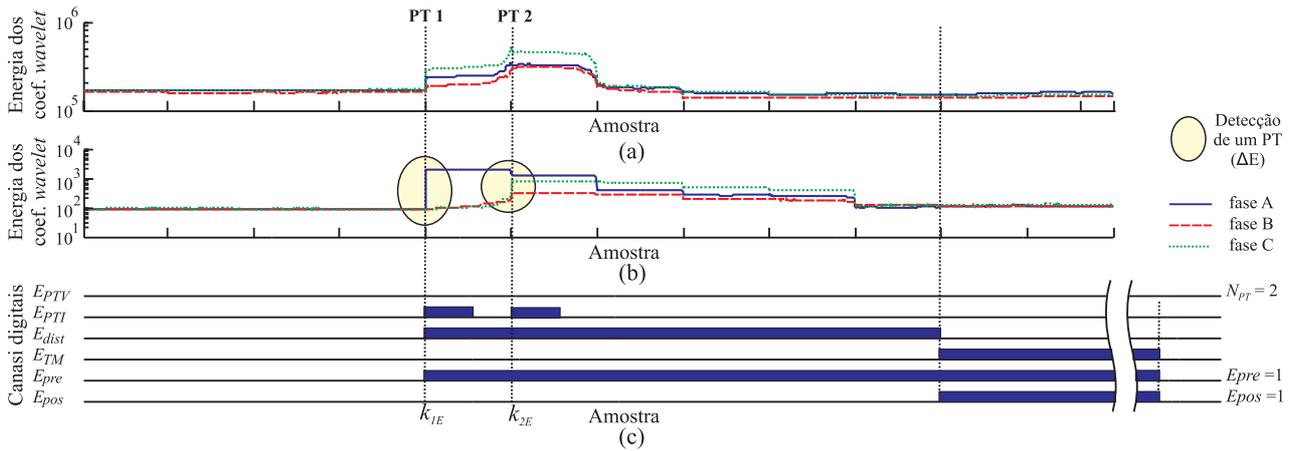


Figura 4.32. Transitórios em uma linha de transmissão ocasionados pelo desligamento de outra linha de transmissão: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

Na Figura 4.33 são ilustradas as tensões e correntes de fase, de um registro real com transitórios referente a uma manobra de desligamento de uma LT, com o terminal remoto fechado, cujo ponto de monitoramento foi o terminal remoto. Durante os primeiros ciclos, o sistema estava operando em regime permanente, conforme a carga alimentada. Após a manobra de chaveamento, as correntes passaram a ser capacitivas, visto que a LT passou a se comportar como uma carga capacitiva. Normalmente, os valores de pico das tensões não sofrem grandes alterações e não há incidência de transitórios severos durante o chaveamento. Os registros ilustrados nas Figuras 4.29, 4.31 e 4.33 são referentes a uma única manobra de chaveamento.

Na Figura 4.34 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com transitórios de chaveamento da Figura 4.33, destacando-se as variações bruscas de energia em k_{1E} . Após k_{1E} , as energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} voltaram ao regime permanente quando $E_{dist}=\downarrow$. Por fim, o distúrbio foi classificado como transitórios de chaveamento, visto que $N_{PT}=1$, $E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$.

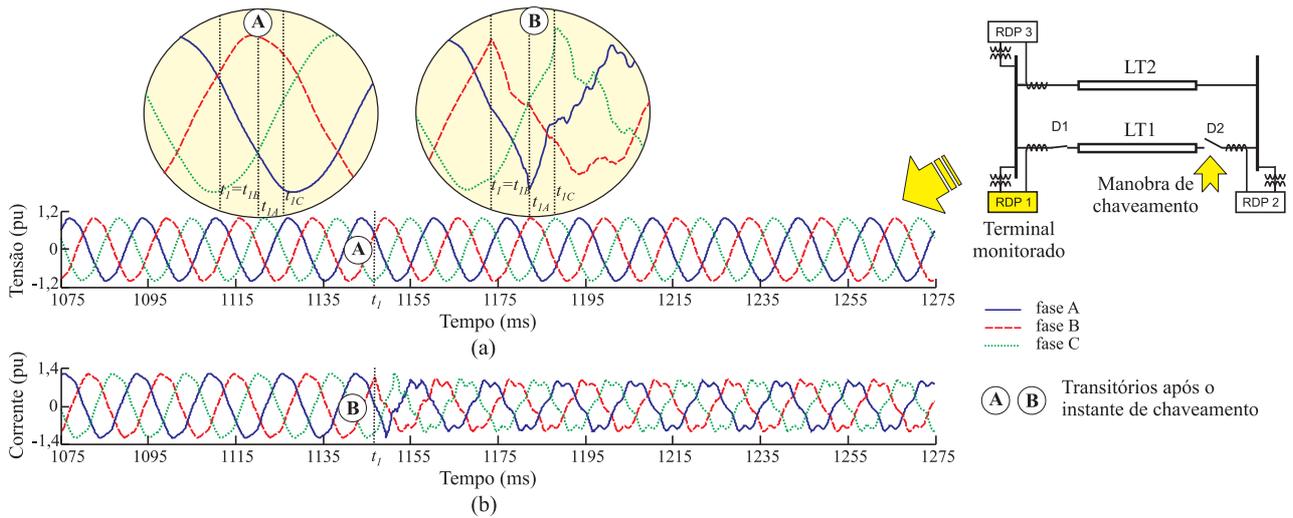


Figura 4.33. Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal remoto: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

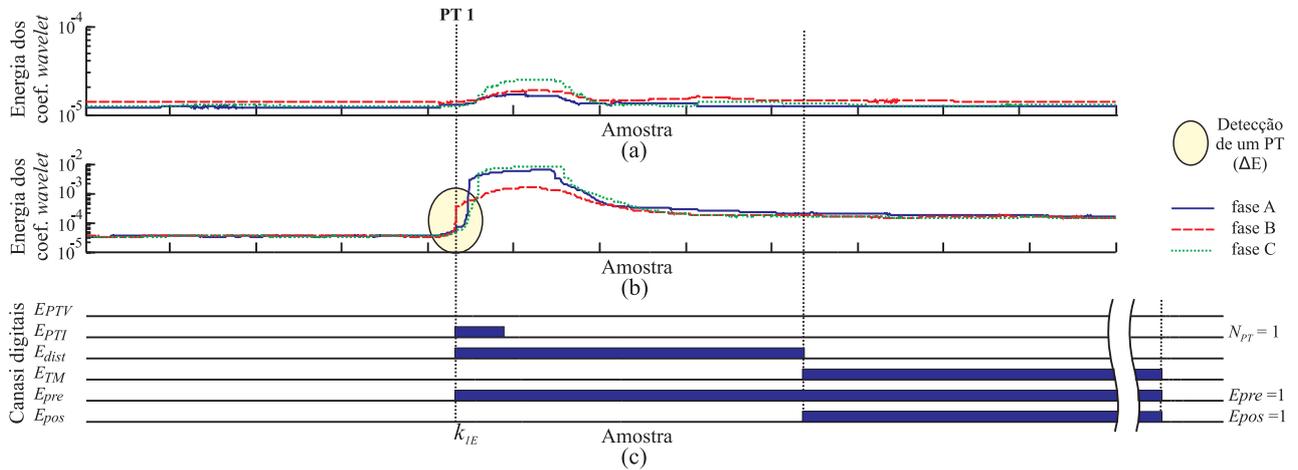


Figura 4.34. Desligamento de uma linha de transmissão com terminal remoto fechado, com monitoramento no terminal remoto: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

4.7.2 Desligamento de uma Linha de Transmissão com o Terminal Remoto em Aberto

No desligamento de uma LT com o terminal remoto em aberto, as amostras de corrente coletadas pelo RDP no terminal local são capacitivas antes da manobra (Figura 4.35(a)). Após a manobra de desligamento, as correntes no ponto de monitoramento se anulam. No entanto, devido ao acoplamento elétrico com outras LTs do sistema elétrico, os valores de pico das tensões podem atingir algumas dezenas de kilo volts. No terminal remoto, entretanto, as correntes são nulas em todo o registro (Figura 4.35(b)). Na tese de doutorado, o diagnóstico do registro da Figura 4.35(a) é de um desligamento, enquanto que na Figura 4.35(b) tem-se transitórios de chaveamento (energias com comportamento similar às energias da Figura 4.25).

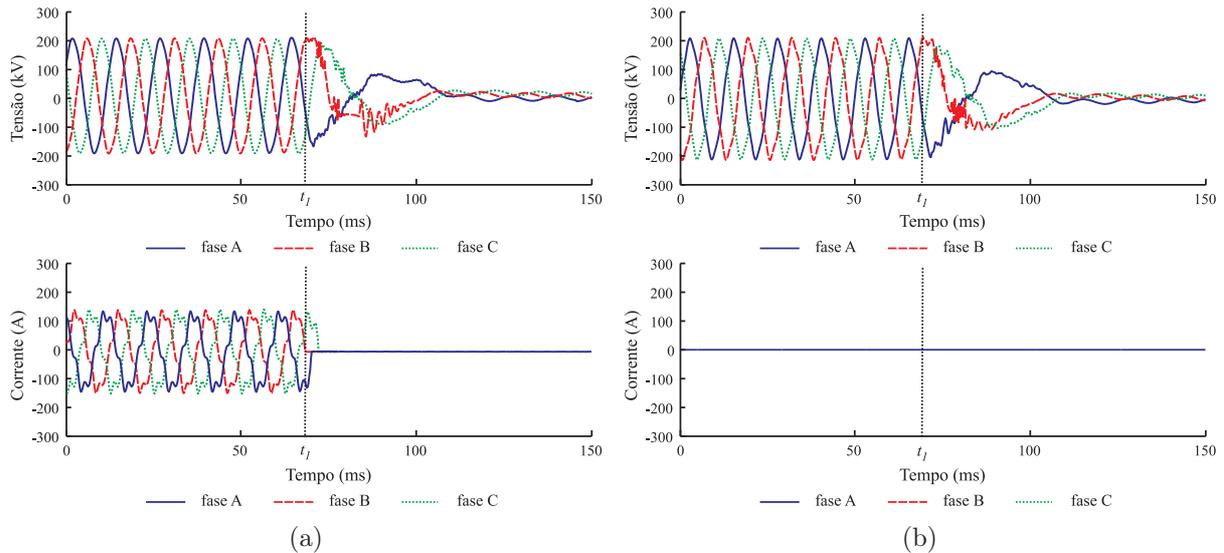


Figura 4.35. Desligamento de uma LT com um terminal em aberto: (a) registro proveniente do terminal local; (b) registro proveniente do terminal remoto.

4.8 ENERGIZAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

A utilização de bancos de capacitores é muito comum em sistemas de potência para corrigir o fator de potência e reduzir perdas no sistema. No entanto, manobras de chaveamento de um banco de capacitores provocam o surgimento de transitórios oscilatórios.

Os transitórios decorrentes de uma manobra de chaveamento de bancos de capacitores são caracterizados por oscilações devido a interação entre a capacitância do banco e a indutância do sistema (DUGAN *et al.*, 2003). De um modo geral, a corrente de energização possui transitórios de elevada magnitude, função do ângulo de fase da tensão da barra no instante de fechamento do disjuntor. Outro fator importante que influencia nos transitórios é a dispersão mecânica dos pólos do disjuntor na energização do banco de capacitores (CARVALHO, 1995).

Na Figura 4.36 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real com energização de um banco de capacitores, destacando-se alguns fenômenos transitórios nas tensões e correntes ao longo da manobra de chaveamento. Neste caso, observam-se pré-transitórios em t_1 . Em seguida, tem-se o contato mecânico dos pólos nas fases B, A e C do disjuntor nos instantes t_{2B} , t_{2A} e t_{2C} , respectivamente. De um modo geral, registros oscilográficos com energização de banco de capacitores (Figura 4.36) apresentam características similares a uma energização de uma LT com o terminal remoto em aberto (Figura 4.20).

Na Figura 4.37 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com energização de bancos de capacitores da Figura 4.36, destacando-se as variações bruscas de energia em k_{1E} e k_{2E} . Após k_{2E} , as energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} voltaram ao regime permanente, em $E_{dist}=\downarrow$. O distúrbio foi classificado como energização, visto que $E_{pre}=0$ e $E_{pos}=1$. Neste caso, $N_{PT}=2$, com $k_{2E}-k_{1E}<2\Delta k$.

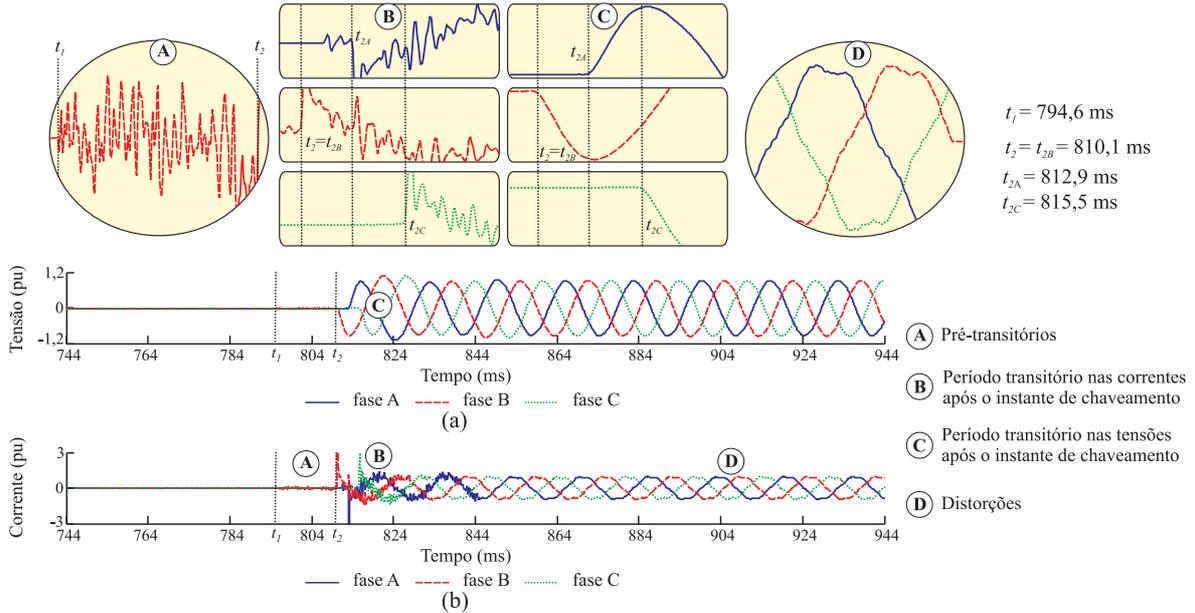


Figura 4.36. Registro oscilográfico real com energização de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

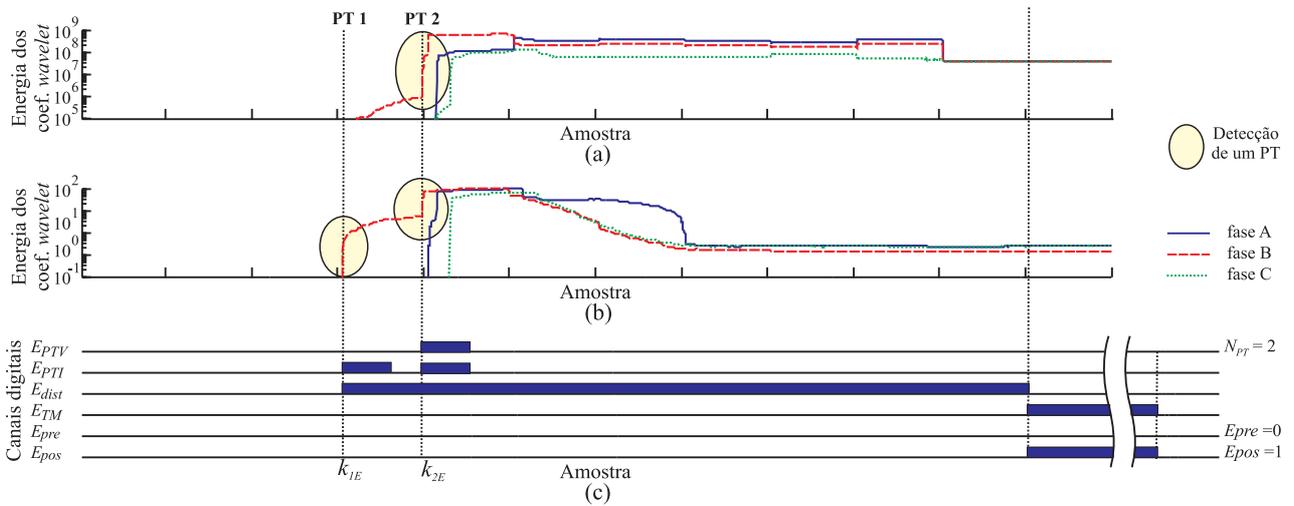


Figura 4.37. Energização de um banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

Na Figura 4.38 são ilustradas as tensões e correntes de fase em uma LT, cujos transitórios foram ocasionados pela energização do banco de capacitores da Figura 4.36. Devido ao acoplamento elétrico do sistema de potência, observam-se os pré-transitórios e os transitórios relacionados à energização do banco de capacitores nos instantes t_1 e t_2 , respectivamente.

Na Figura 4.39 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com transitórios de chaveamento da Figura 4.38. Neste caso, apenas o PT referente aos transitórios no instante t_1 foram detectados pelo critério do aumento brusco de energia ($E_{PT}=\uparrow$, em k_{1E}). O distúrbio foi classificado como transitórios de chaveamento, visto que $E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$, com $N_{PT}=1$.

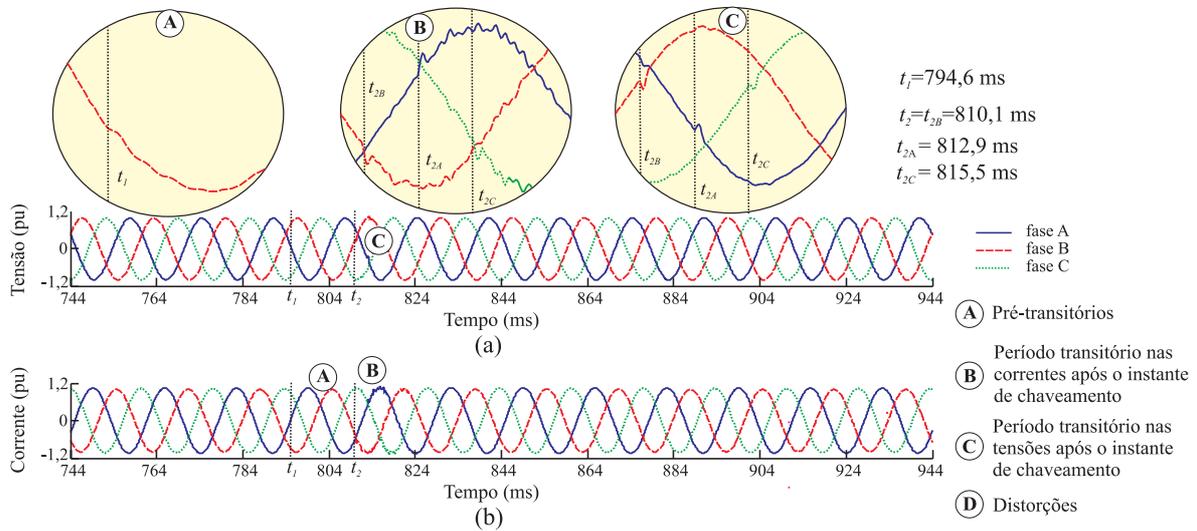


Figura 4.38. Registro oscilográfico real com transitórios de chaveamento devido à energização de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

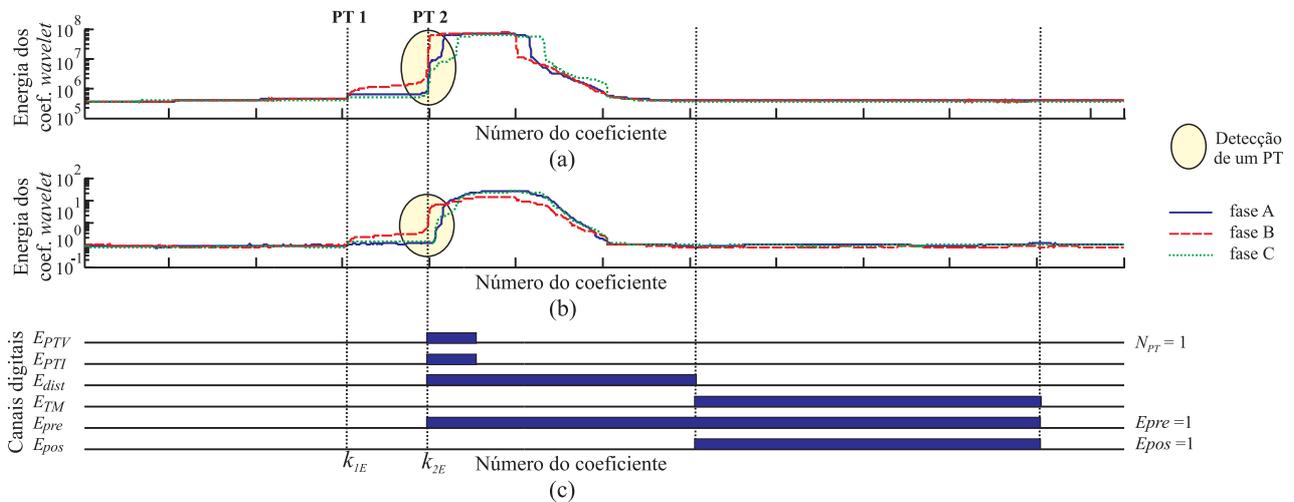


Figura 4.39. Transitórios de chaveamento devido à energização de banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

4.9 DESLIGAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES

Na Figura 4.40 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro oscilográfico real com desligamento de um banco de capacitores, destacando-se os pré-transitórios em t_1 (início do arco elétrico no desacoplamento mecânico entre os pólos do disjuntor) e os transitórios na interrupção das correntes, nos instantes t_{1B} , t_{1A} e t_{1C} , respectivamente.

Na Figura 4.41 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com desligamento de banco de capacitores da Figura 4.40. O distúrbio foi classificado como desligamento, visto que $E_{pre}=1$, $E_{pos}=0$ e $N_{PT}=2$, com $k_{2E}-k_{1E}<2\Delta k$.

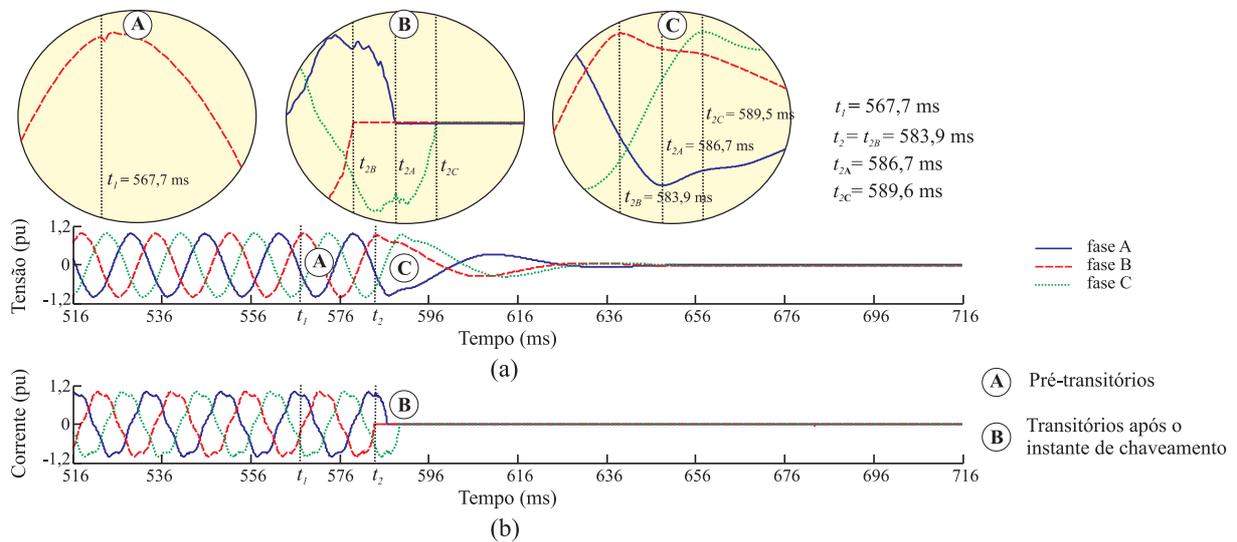


Figura 4.40. Registro oscilográfico real com desligamento de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

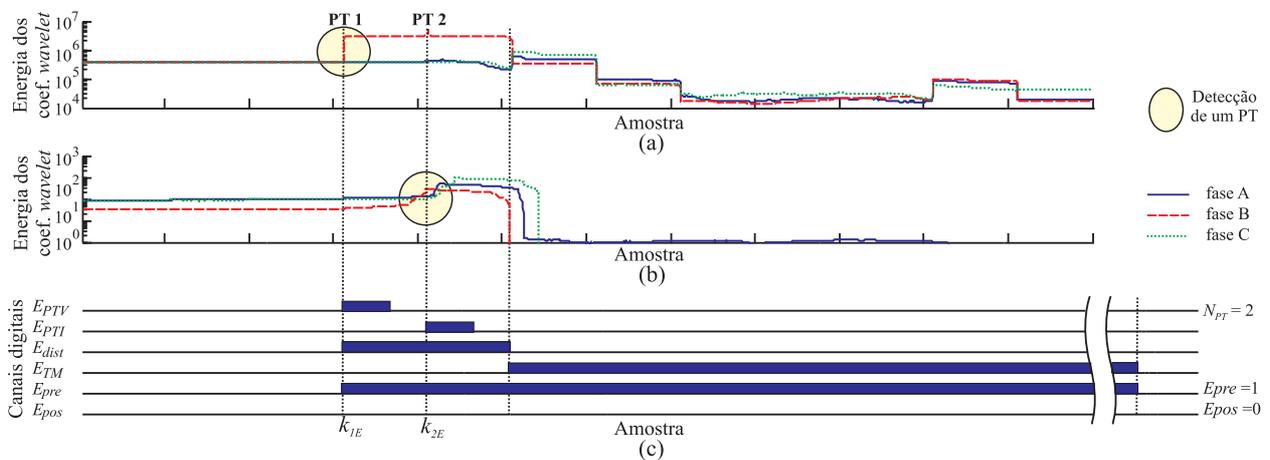


Figura 4.41. Desligamento de um banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

Na Figura 4.42 são ilustradas as tensões e correntes de fase em uma LT, cujos transitórios foram ocasionados pelo desligamento do banco de capacitores da Figura 4.40. Devido ao acoplamento elétrico do sistema de potência, observam-se os pré-transitórios e os transitórios relacionados ao desligamento do banco de capacitores nos instantes t_1 e t_2 , respectivamente.

Na Figura 4.43 são ilustradas as curvas de energia (\mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}) e as variáveis binárias de diagnóstico (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} e E_{pos}) do registro com transitórios de chaveamento da Figura 4.42. O distúrbio foi classificado como transitórios de chaveamento, visto que $E_{pre}=1$, $E_{pos}=1$ e $N_{PT}=2$, com $k_{2E}-k_{1E}<2\Delta k$.

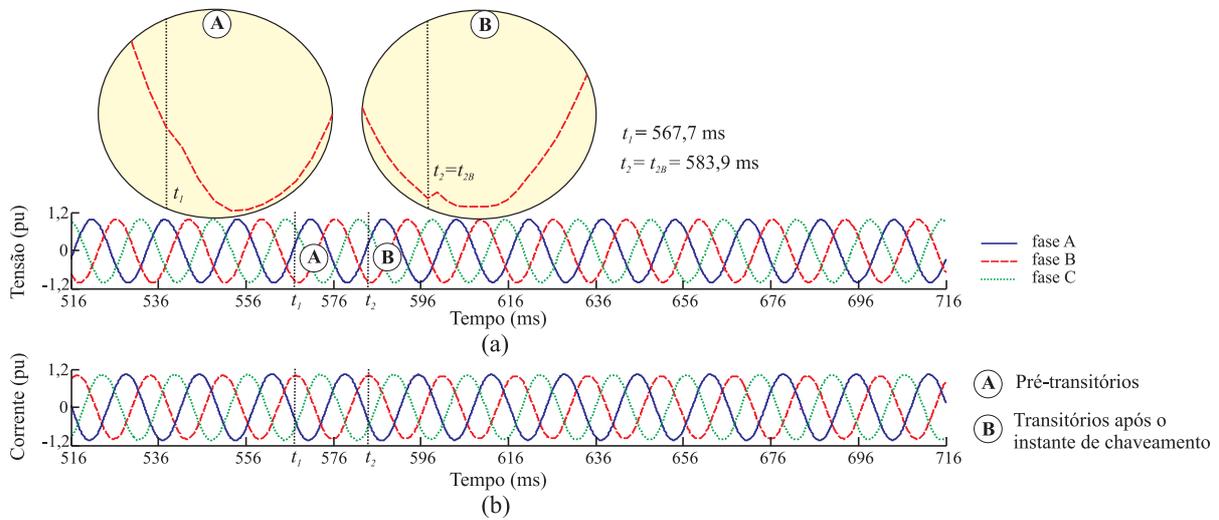


Figura 4.42. Registro oscilográfico real com transitórios de chaveamento devido ao desligamento de um banco de capacitores: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

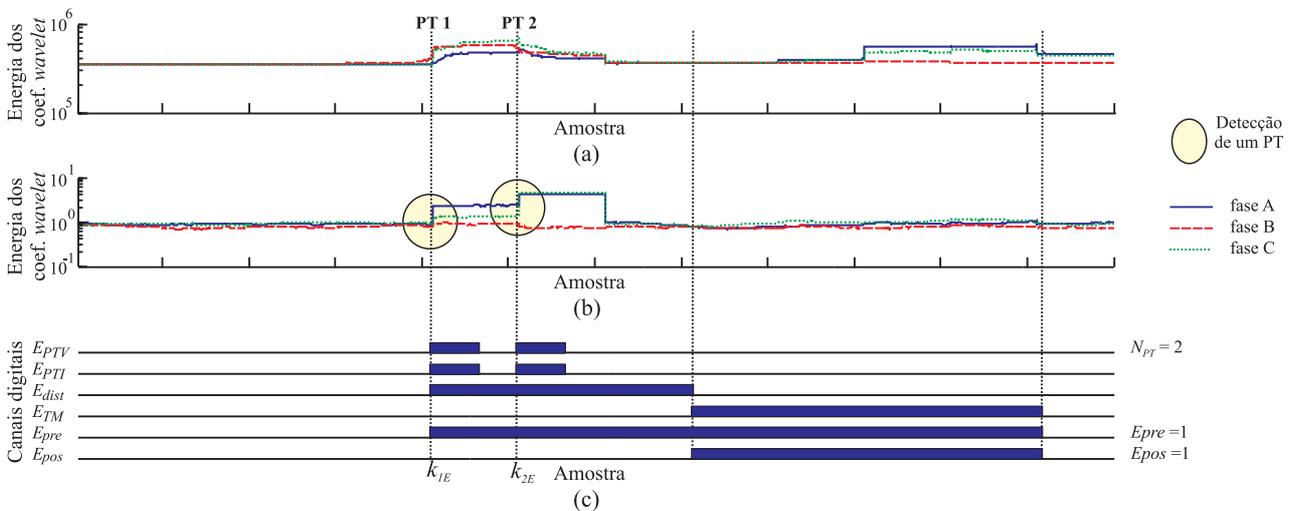


Figura 4.43. Transitórios de chaveamento devido ao desligamento de banco de capacitores: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

4.10 MÚLTIPLOS DISTÚRBIOS TRANSITÓRIOS

Algumas faltas em LTs são temporárias e, nestes casos, o auto-religamento da LT implica uma rápida restauração do sistema elétrico de potência. Tipicamente, o tempo morto referente ao primeiro religamento é da ordem de 0,5 a 1,5 s (30 a 90 ciclos em 60 Hz), mas pode ser frequentemente ajustado pelos engenheiros de planejamento (IEEE STD C37.104-2002, 2003). Dependendo do tempo de religamento, dados relacionados às faltas e aos religamentos em uma LT podem ser armazenados em um único registro oscilográfico (múltiplos distúrbios).

Na Figura 4.44 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registros oscilográfico real com uma falta, seguido por um religamento automático (múltiplos distúrbios). Na Figura 4.45 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registro com afundamento de tensão, seguido por transitórios de chaveamento devido aos distúrbios da Figura 4.44.

As energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} do registro com falta seguido por religamento automático e do registro com afundamento de tensão seguido por transitórios de chaveamento, assim como as respectivas variáveis binárias de diagnóstico são ilustradas nas Figuras 4.46 e 4.47, respectivamente.

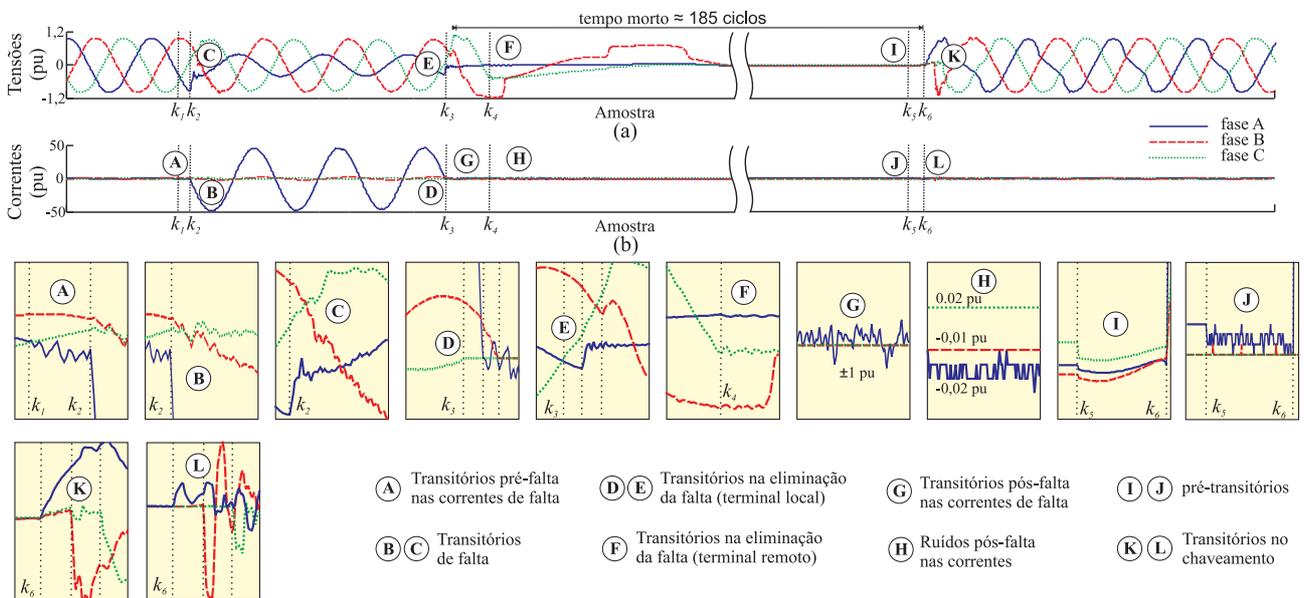


Figura 4.44. Registro oscilográfico real com uma falta seguido por um religamento automático: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

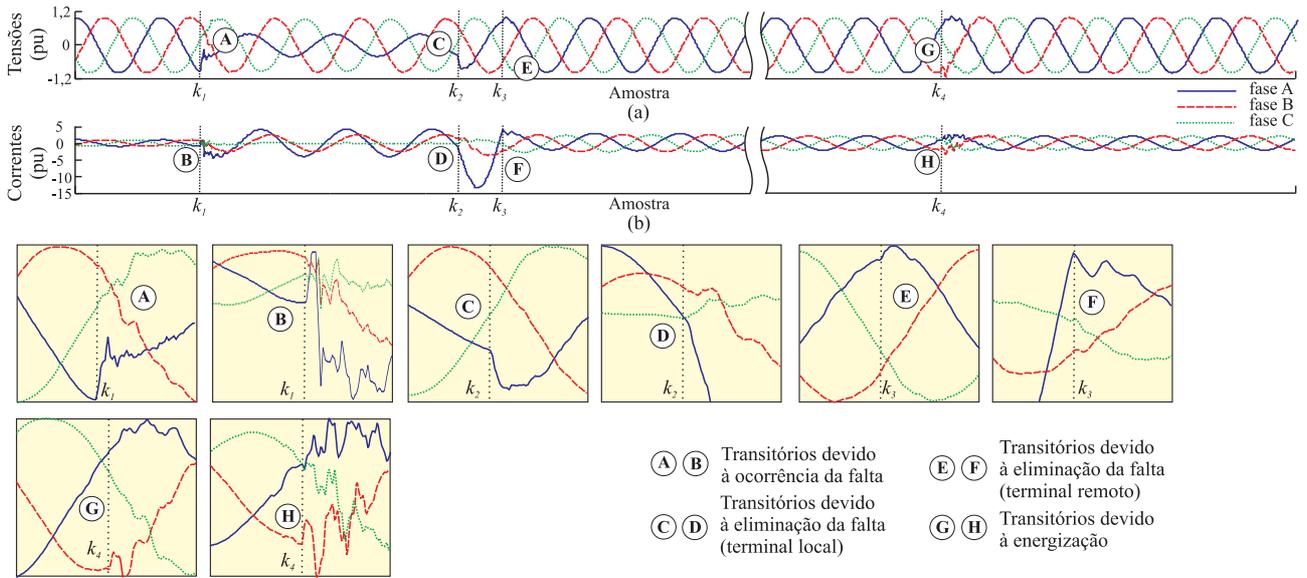


Figura 4.45. Registro oscilográfico real com afundamento de tensão seguido por transitórios de chaveamento: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

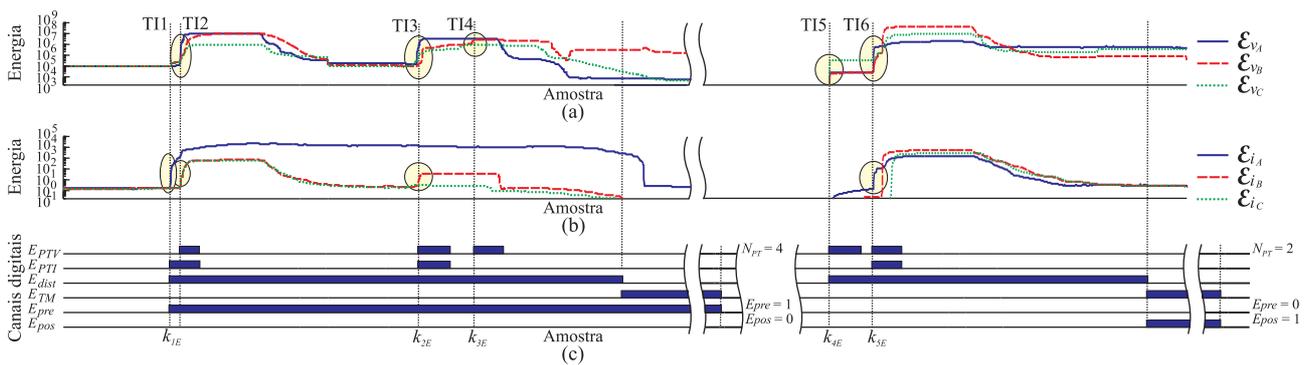


Figura 4.46. Energia janelada dos coeficientes *wavelet* de um registro real com uma falta seguido por um religamento automático: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico dos distúrbios.

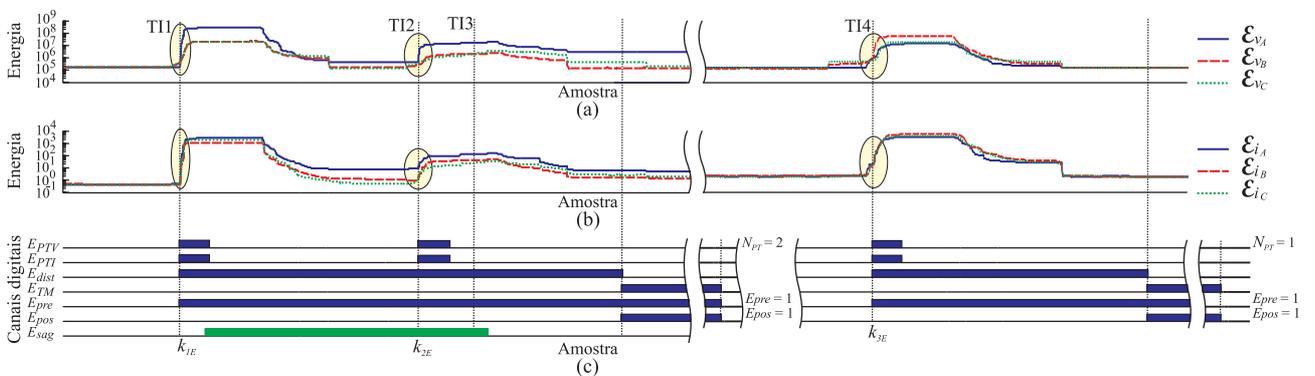


Figura 4.47. Energia janelada dos coeficientes *wavelet* de um registro real com afundamento de tensão seguido por transitórios de chaveamento: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico dos distúrbios.

Conforme a Figura 4.46, o primeiro distúrbio foi classificado como falta ($n_{PT}=3$, $E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$) e o segundo, como energização ($N_{PT}=2$, $E_{pre}=0$ e $E_{pos}=1$). Na Figura 4.47, por outro lado, o distúrbio foi classificado como afundamento de tensão ($N_{PT}=2$, $k_{2E}-k_{1E}>2\Delta k$, $E_{pre}=1$, $E_{pos}=1$ e $E_{sag}=1$ por mais de meio ciclo durante $E_{dist}=1$), seguido por transitórios de chaveamento ($N_{PT}=1$, $E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$).

4.11 TENTATIVA DE RELIGAMENTO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO COM FALTA

Dependendo da natureza da falta (transitória ou permanente), o religamento automático pode não ser realizado com sucesso. Neste caso, tem-se um registro oscilográfico com falta, seguido por tentativa de religamento, ou simplesmente, dois registros oscilográficos, um com falta e outro com tentativa de religamento.

Na Figura 4.48 são ilustradas as tensões e correntes de fase de um registros oscilográfico real com uma tentativa de religamento de uma LT com falta. Neste caso, observa-se a atuação da proteção em aproximadamente dois ciclos após a manobra de religamento.

As curvas de energia referentes ao registro da Figura 4.48 são apresentadas na Figura 4.49. O comportamento das energias é similar ao de uma falta (Figura 4.11). Porém, em tentativa de religamento, tem-se $E_{pre}=0$ e $E_{pos}=0$.

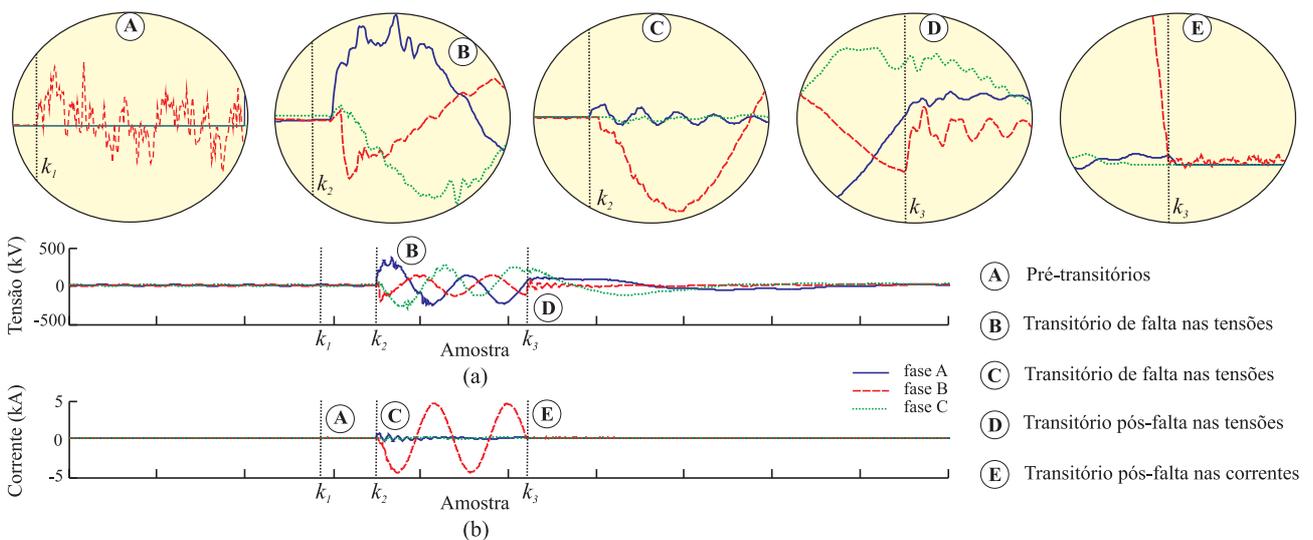


Figura 4.48. Registro oscilográfico real com uma tentativa de religamento automático de uma linha com falta: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

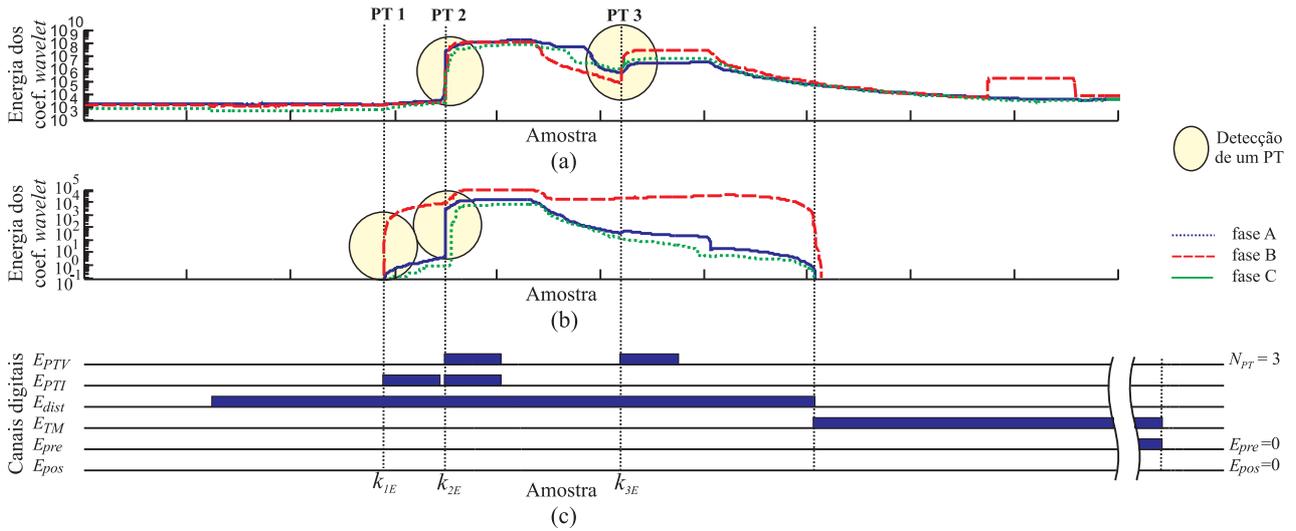


Figura 4.49. Tentativa de religamento automático de uma linha com falta: (a) \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} e \mathcal{E}_{v_C} ; (b) \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} ; (c) canais digitais com o diagnóstico do distúrbio.

4.12 DETECÇÃO EM TEMPO REAL DOS DISTÚRBIOS TRANSITÓRIOS

Na Figura 4.50 é ilustrado o fluxograma simplificado do método de detecção em tempo real dos distúrbios transitórios. O fluxograma é executado a cada passo de tempo e, notavelmente, possui a função precípua de modificar, em tempo real, as variáveis binárias de diagnóstico E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} , E_{pos} e E_{sag} , à medida em que os distúrbios vão ocorrendo no sistema de transmissão, conforme explicado ao longo deste capítulo.

Por questões de simplificação, o fluxograma da Figura 4.50 foi dividido em três blocos, descritos a seguir

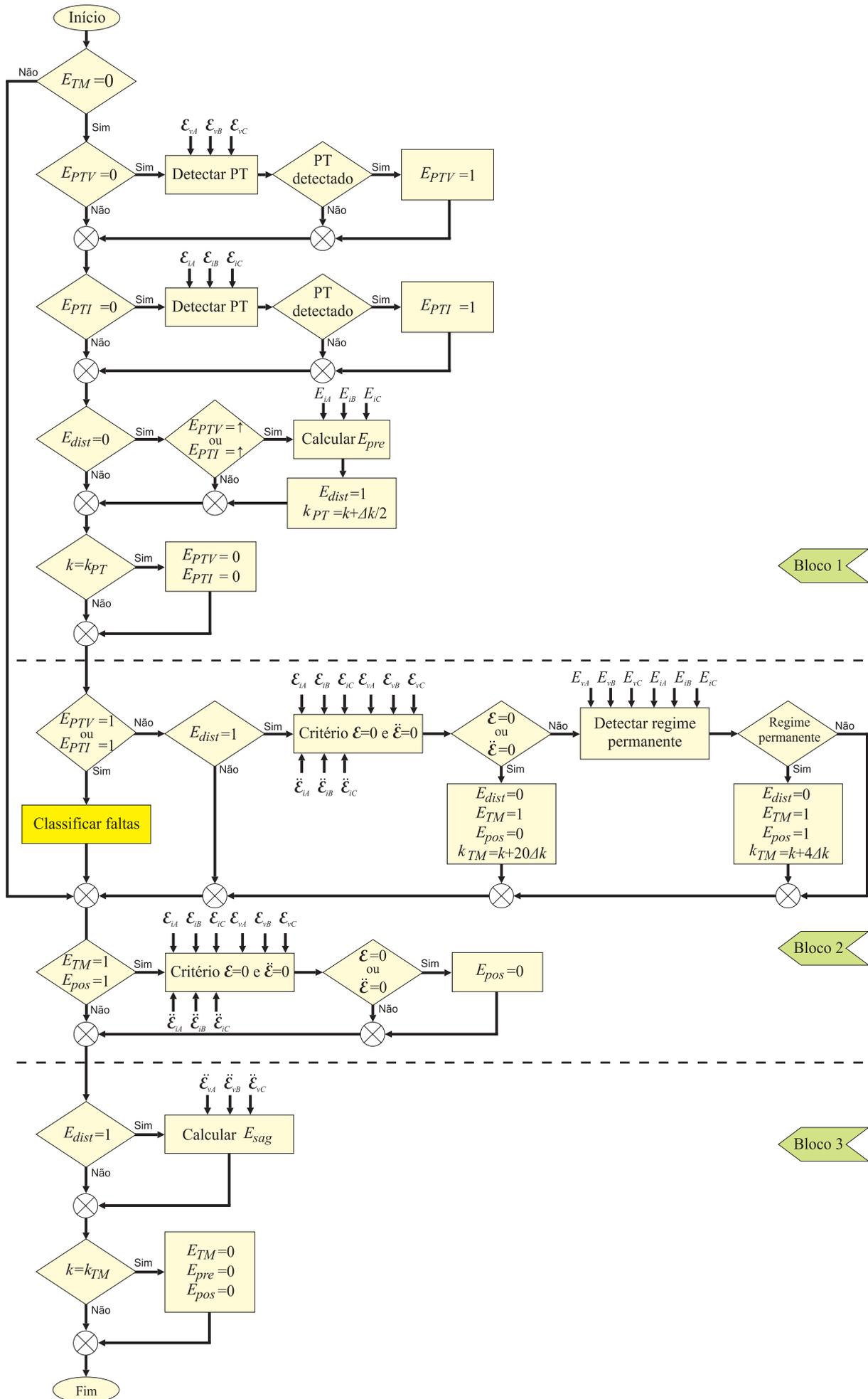
- No bloco 1, quando $E_{PTV}=0$ e $E_{TM}=0$, um PT pode ser detectado na ocorrência de um aumento brusco em uma das energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} ou \mathcal{E}_{v_C} , que resulta em $E_{PTV}=\uparrow$. Da mesma forma, quando $E_{PTI}=0$ e $E_{TM}=0$, um PT pode ser detectado na ocorrência de um aumento brusco em uma das energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} ou \mathcal{E}_{i_C} . Na detecção do primeiro PT de um distúrbio ($E_{PTV}=\uparrow$ ou $E_{PTI}=\uparrow$, quando $E_{dist}=0$), tem-se $E_{dist}=\uparrow$, o instante $k_{PT}=k+\Delta k/2$ (meio ciclo adiante) e o valor de E_{pre} é identificado, conforme os valores médios de energia (\mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C}). Por fim, meio ciclo após a detecção do atual PT, instante identificado por k_{PT} , tem-se $E_{PTV}=0$ e $E_{PTI}=0$.

- No bloco 2, quando $E_{PTV}=1$ ou $E_{PTI}=1$, o módulo de classificação de faltas é ativado (escopo do próximo capítulo). Por outro lado, quando $E_{PTV}=0$, $E_{PTI}=0$, $E_{TM}=0$ e $E_{dist}=1$, o método vai em busca do instante final do distúrbio transitório, identificando a volta das energias ao regime permanente ou identificando $\mathcal{E}=0$. Quando isto ocorre, o método vai para o estado de espera ($E_{TM}=\uparrow$ e $E_{dist}=\downarrow$) e atualiza o valor de E_{pos} . Durante o estado de espera, apenas o valor de E_{pos} poderá ser atualizado para o valor zero.
- No bloco 3, enquanto $E_{dist}=1$, o valor de E_{sag} é atualizado sempre que o afundamento de tensão for identificado nas energias dos coeficientes de aproximação das tensões ($\ddot{\mathcal{E}}_{v_A}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{v_B}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{v_C}$). Além disto, no instante final do estado de espera ($E_{TM}=\downarrow$), o método reinicia todas as variáveis lógicas e segue a procura de um novo distúrbio.

No RDP proposto, as tensões, as correntes e as variáveis lógicas de diagnóstico são armazenadas na memória interna (Capítulo 6). Na ocorrência de um distúrbio transitório, o dispositivo de monitoramento armazena as tensões e correntes nos canais analógicos e as variáveis lógicas de diagnóstico nos canais digitais de um novo registro oscilográfico. O tamanho do registro oscilográfico é função dos instantes inicial (em $E_{dist}=\uparrow$) e final (em $E_{TM}=\downarrow$) do distúrbio. Os instantes pré e pós-distúrbios, com duração de cinco ciclos, também são armazenados nos registros.

Após a ocorrência de um distúrbio (após $E_{TM}=\downarrow$), o dispositivo de monitoramento aguarda um segundo (60 ciclos), prosseguindo com suas análises normalmente. Caso outro distúrbio transitório ocorra durante este período, o RDP gera um registro com múltiplos distúrbios, a exemplo de uma falta seguida por um religamento automático.

O método de detecção de distúrbios não realiza a classificação dos distúrbios diretamente. Porém, a classificação está presente ao longo da ocorrência dos distúrbios, implicitamente, nas variáveis lógicas de diagnóstico, disponibilizadas nos canais digitais dos registros, e pode ser utilizada na análise manual dos canais digitais. Além disso, a classificação dos distúrbios nos registros oscilográficos pode ser obtida por um programa de computador que execute o fluxograma ilustrado na Figura 4.51, no instante $E_{TM}=\downarrow$.



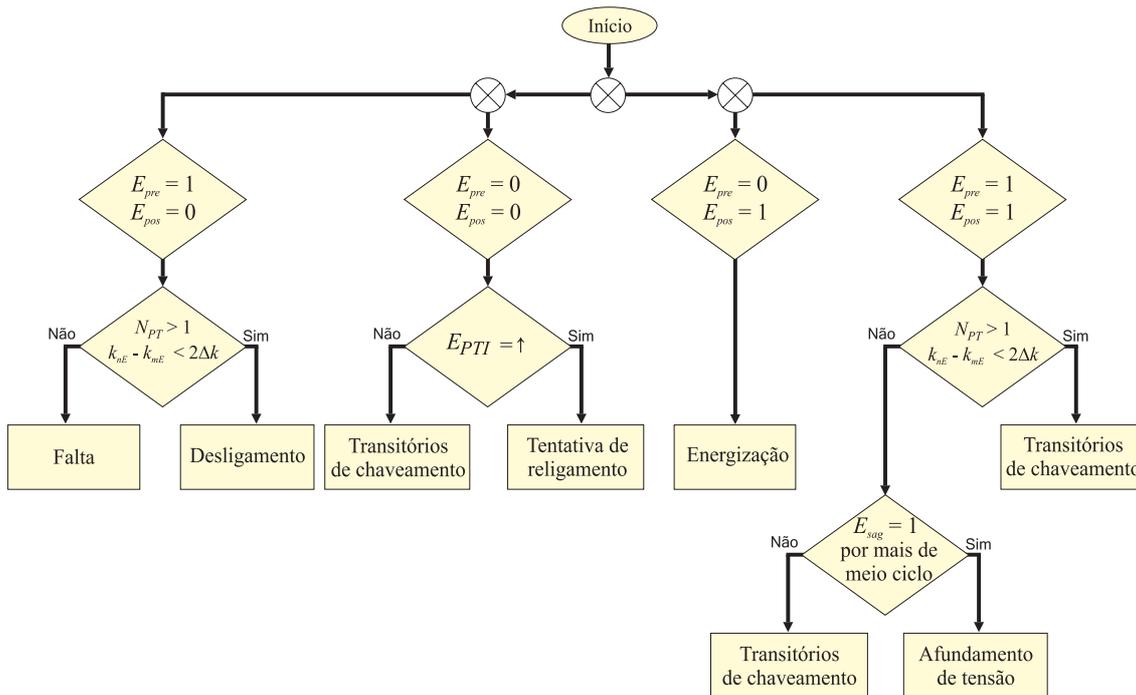


Figura 4.51. Fluxograma do método de classificação de distúrbios.

4.13 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os distúrbios transitórios em sistemas de transmissão apresentados neste capítulo são bem caracterizados pela incidência de transitórios nas tensões e correntes. A energia dos coeficientes *wavelet* referente aos transitórios (proporcional à energia dos transitórios), de modo geral, se diferencia sobremaneira da energia dos coeficientes *wavelet* calculada no regime permanente (energia relacionada aos ruídos). A energia dos coeficientes *wavelet*, em um ciclo, foi usada para detecção e classificação dos principais distúrbios transitórios, cujos valores típicos das variáveis binárias e o respectivo diagnóstico são apresentados na Figura 4.52.

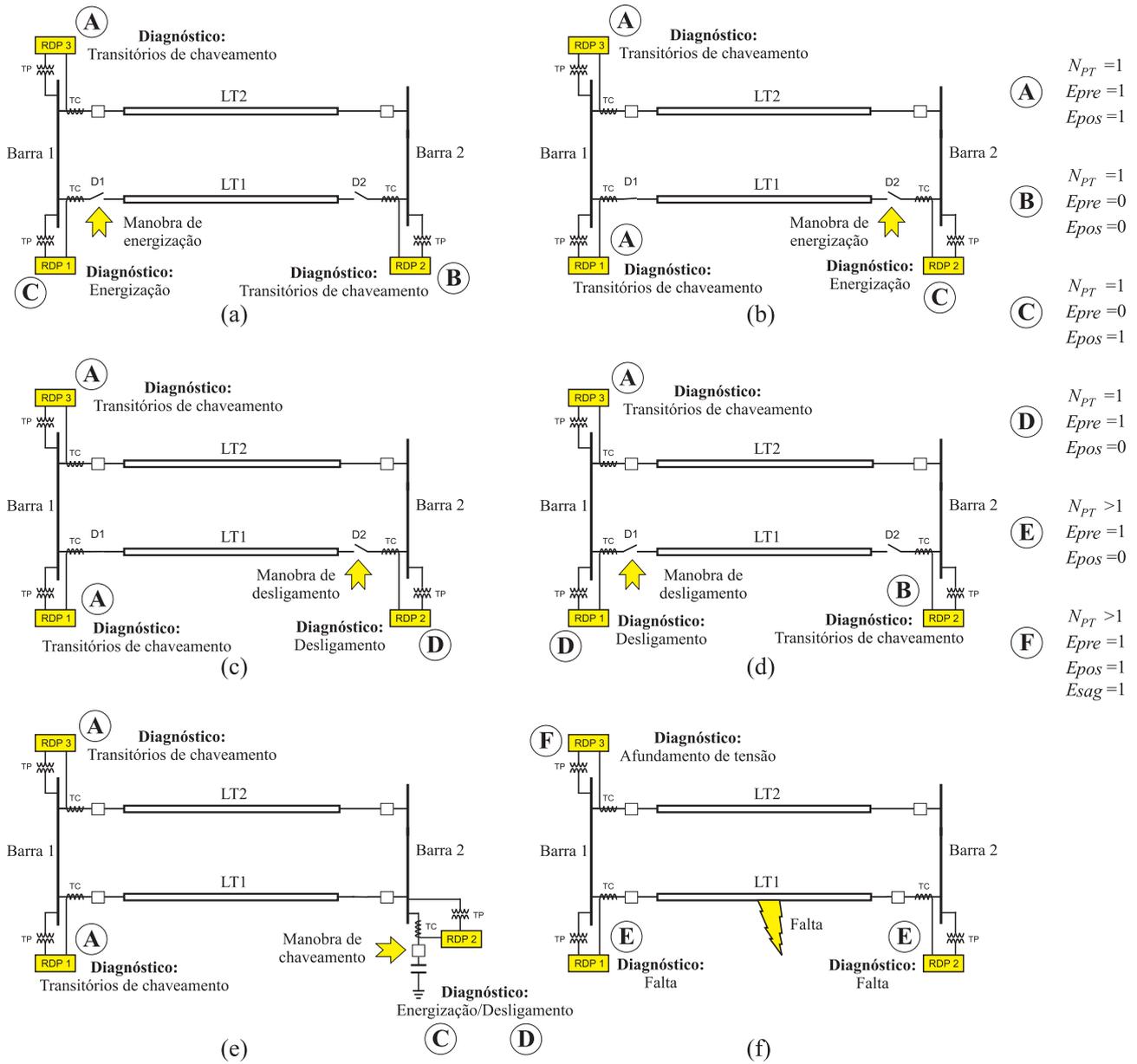


Figura 4.52. Principais distúrbios transitórios em sistemas de transmissão: (a) energização de uma LT com o terminal remoto em aberto; (b) energização de uma LT com o terminal remoto fechado; (c) desligamento de uma LT com o terminal remoto fechado; (d) desligamento de uma LT com o terminal remoto em aberto; (e) energização/desligamento de banco de capacitores; (f) falta em uma LT.

FALTAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

O comportamento geral das faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica foi descrito no Capítulo 4. Neste capítulo, o objetivo é estudar o comportamento da energia dos transitórios de falta nas tensões e correntes em função do ângulo de incidência, da resistência e da distância de ocorrência das faltas, por meio da análise da energia dos coeficientes *wavelet*.

O método de detecção, em tempo real, de distúrbios transitórios também foi escopo do Capítulo 4. Conforme ilustrado na Figura 4.50, todas as vezes que um PT é detectado, o método de classificação de faltas é executado, em tempo real, por um período de meio ciclo (enquanto $E_{PTV}=1$ ou $E_{PTI}=1$). A descrição detalhada do método de classificação, em tempo real, de faltas também é feita neste capítulo.

5.1 MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO

O ângulo de incidência de falta (θ_f), a resistência de falta (r_f) e a localização de falta (d_f) são os principais parâmetros que influenciam as características particulares de cada tipo de falta (ANDERSON, 1999). O comportamento dos transitórios de falta em função de θ_f , r_f e d_f foram verificados por meio de simulações realizadas no RTDSTM, utilizando um modelo simplificado de um sistema elétrico de 230 kV (SILVA *et al.*, 2008), composto por uma LT de 180 km, com parâmetros distribuídos, com uma fonte conectada na barra 1 e uma carga ($422,8+j211,9 \Omega$) conectada na barra 2 (Figura 5.1). Os parâmetros do sistema elétrico são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

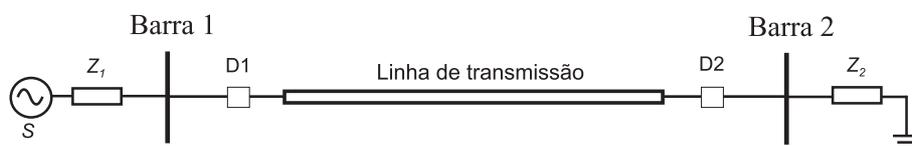


Figura 5.1. Sistema elétrico analisado.

Tabela 5.1. Dados da fonte do sistema de 230 kV.

Módulo (kV)	Fase ($^\circ$)	Sequência	$Z_1(\Omega) \angle \delta_1 = r_1(\Omega) + jx_1(\Omega)$
234,6	0	Positiva	$25,67 \angle 88,05 = 0,8735 + j25,6551$
		Zero	$18,78 \angle 86,90 = 1,0156 + j18,7525$

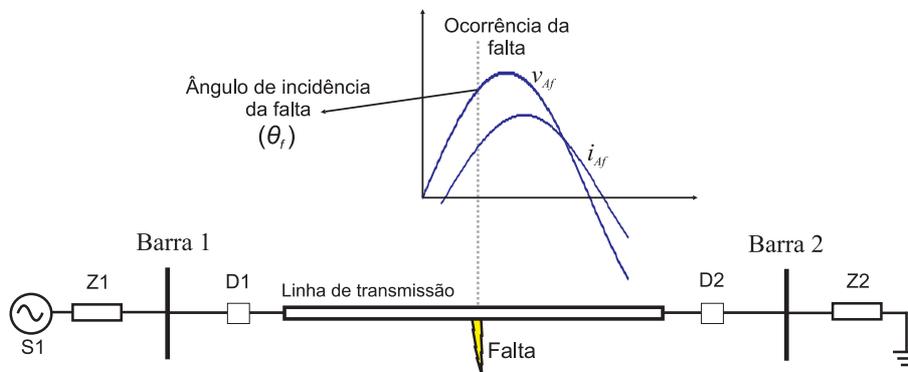
Tabela 5.2. Dados da linha de transmissão do sistema de 230 kV.

Sequência	$r_{LT} (\Omega/Km)$	$xl_{LT} (\Omega/Km)$	$yc_{LT} (\mu S/Km)$
Positiva	0,098	0,510	3,252
Zero	0,532	1,541	2,293

A influência dos parâmetros de falta foi avaliada nas tensões e correntes $v_A, v_B, v_C, v_N, i_A, i_B, i_C$ e i_N e nas respectivas energias dos coeficientes *wavelet* $\mathcal{E}_{v_A}, \mathcal{E}_{v_B}, \mathcal{E}_{v_C}, \mathcal{E}_{v_N}, \mathcal{E}_{i_A}, \mathcal{E}_{i_B}, \mathcal{E}_{i_C}$ e \mathcal{E}_{i_N} da barra 1, mediante aplicação de faltas ao longo da LT. Os TPCs e TCs não foram utilizados nas simulações, visto que os sinais provenientes destes instrumentos de medição podem conter saturações em uma situação de falta, dificultando assim a identificação do efeito dos parâmetros θ_f, r_f e d_f na energia dos transitórios de falta (e na energia dos coeficientes *wavelet*).

O índice f , utilizado em algumas variáveis neste capítulo, refere-se ao local de ocorrência da falta. As tensões e correntes no local de ocorrência da falta são referenciadas por $v_{Af}, v_{Bf}, v_{Cf}, v_{Nf}, i_{Af}, i_{Bf}, i_{Cf}$ e i_{Nf} , enquanto que as respectivas energias dos coeficientes *wavelet* são representadas por $\mathcal{E}_{v_{Af}}, \mathcal{E}_{v_{Bf}}, \mathcal{E}_{v_{Cf}}, \mathcal{E}_{v_{Nf}}, \mathcal{E}_{i_{Af}}, \mathcal{E}_{i_{Bf}}, \mathcal{E}_{i_{Cf}}$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}$, respectivamente.

Considera-se o ângulo de incidência de falta como o ângulo de fase da tensão da fase A, no local da falta, tomando como referência de tempo a passagem da tensão pelo zero, conforme ilustrado na Figura 5.2.


Figura 5.2. Ângulo de incidência de falta.

Na Figura 5.3 é ilustrada a representação de dois elementos infinitesimais da LT trifásica modelada no RTDS, normalmente utilizada para se estudar a propagação de ondas eletromagnéticas em LTs (ZANETA Jr., 2003). Cada elemento infinitesimal da linha é representado por: uma resistência em série com uma indutância, por fase; capacitores e indutores conectados entre as fases (acoplamento capacitivo e indutivo entre fases); capacitores conectados entre as fases e a terra.

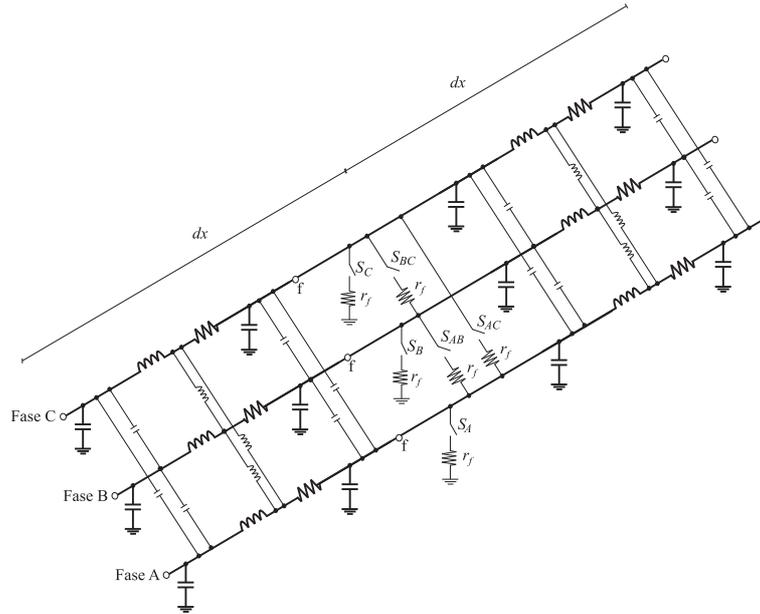


Figura 5.3. Esquema de aplicação de faltas em um trecho da linha de transmissão trifásica com parâmetros distribuídos.

O esquema de aplicação de faltas também é ilustrado na Figura 5.3, no ponto f , entre os dois elementos infinitesimais da LT. As faltas são simuladas por meio de uma resistência em série com uma chave (TLEIS, 2008), contemplando as faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas para a terra e trifásicas pela manipulação das chaves (S_A , S_B , S_C , S_{AB} , S_{BC} e S_{AC}).

5.2 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE FALTA NA ENERGIA DOS TRANSITÓRIOS

A obtenção analítica das equações da energia dos transitórios de falta em função de θ_f é sobremodo complexa, principalmente devido ao modelo de linha de transmissão que apresenta resistências, indutâncias e capacitâncias distribuídas ao longo de seu comprimento, de valores variáveis com a frequência. Como discutido nos capítulos precedentes, além dos transitórios,

as tensões e correntes são compostas por outras componentes de frequência durante a falta (componente fundamental, componente DC e harmônicas). Porém, o comportamento das energias dos transitórios de falta em função de θ_f pode ser verificado, indiretamente, por meio da variação das energias dos coeficientes *wavelet* em uma escala, cujos coeficientes sejam predominantemente influenciados pelos transitórios de falta (vide Seção 3.8). Essas energias podem fornecer subsídios de grande importância ao desenvolvimento de métodos de classificação de falta baseado nos transitórios.

Para avaliação do efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes, simularam-se faltas AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT e ABC no sistema elétrico da Figura 5.1, com $d_f=90$ km da barra 1, $r_f=10 \Omega$ e $\theta_f=\{0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, \dots, 180^\circ\}$. A duração de cada falta foi de aproximadamente 7 ciclos. Ao total, foram realizadas 1810 simulações no RTDS[®], obtendo-se as tensões e correntes no local da falta ($v_{Af}, v_{Bf}, v_{Cf}, v_{Nf}, i_{Af}, i_{Bf}, i_{Cf}$ e i_{Nf}) e as tensões e correntes na barra 1 ($v_A, v_B, v_C, v_N, i_A, i_B, i_C$ e i_N), com taxa de amostragem de 20000 amostras/s.

5.2.1 Faltas Monofásicas

Uma falta monofásica é caracterizada pela incidência de transitórios na corrente e na tensão da fase com falta e de neutro. Porém, como consequência do acoplamento capacitivo e indutivo entre as fases de uma LT, transitórios são induzidos nas tensões e correntes das fases sãs (ZANETA Jr., 2003), como ilustrado na Figura 5.4, na ocorrência de uma falta AT. Portanto, as energias em todas as correntes e tensões de fase e de neutro devem ser influenciadas pelos transitórios. No entanto, como não há uma ligação física entre as fases da LT, os transitórios e as respectivas energias devem ser mais severos nas tensões e correntes envolvidas com a falta.

Para verificar o efeito de θ_f nas tensões e correntes durante uma falta monofásica, considere o sistema equilibrado no período de pré-falta. Neste caso, as tensões de fase no local e instante de falta são

$$v_f(\theta_f) = V \text{sen}(\theta_f + \delta), \quad (5.1)$$

em que V é a tensão de pico entre a fase e a terra, no local de falta; $\delta=\{\delta_A, \delta_B \text{ e } \delta_C\}=\{0^\circ, -120^\circ \text{ e } 120^\circ\}$ para $v_f=\{v_{Af}, v_{Bf} \text{ e } v_{Cf}\}$, respectivamente.

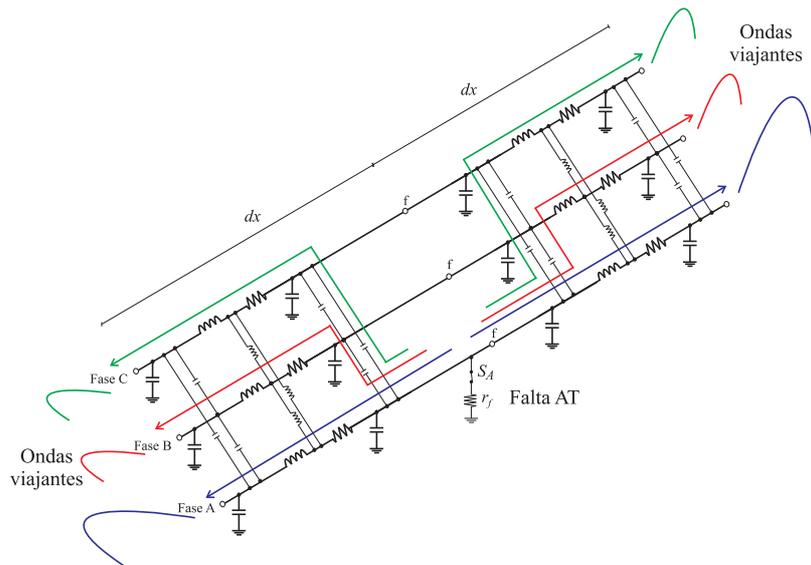


Figura 5.4. Ondas viajantes que se propagam na linha de transmissão em uma falta AT.

Ao considerar r_f , d_f e os parâmetros do sistema constantes, os transitórios de falta são função do ponto de onda de tensão em que ocorre a falta. De acordo com Swift (1979), em uma falta monofásica, o pior caso em ambos os sinais (tensão e corrente) é quando a falta ocorre no valor máximo da tensão de fase envolvida com a falta. Portanto, os transitórios em uma falta monofásica devem ser mais severos em

$$\theta_f + \delta = 90^\circ \pm n180^\circ, \quad (5.2)$$

em que $n=\{0,1,2,\dots\}$. Desta forma, entre 0° e 180° , os transitórios em faltas AT, BT e CT devem ser mais severos quando $\theta_f=90^\circ$, $\theta_f=30^\circ$ e $\theta_f=150^\circ$, respectivamente.

Na Figura 5.5 são ilustradas as tensões e correntes da fase A, no local de falta (v_{Af} e i_{Af}), para as faltas AT com $\theta_f=3^\circ$ e $\theta_f=90^\circ$, respectivamente. Nestes casos, os transitórios nas tensões e correntes foram mais severos em $\theta_f=90^\circ$ (Figura 5.5(b)) e mais amortecidos em $\theta_f=3^\circ$ (Figura 5.5(a)). A amostra k_f está relacionada com o instante em que ocorreu a falta.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 são ilustrados os coeficientes *wavelet* da primeira escala, normalizados, das tensões e correntes no local de falta, para as faltas AT com $\theta_f=3^\circ$ e $\theta_f=90^\circ$. Observou-se que a forma dos coeficientes *wavelet* de um sinal específico não se modifica com θ_f . Por outro lado, a amplitude dos coeficientes *wavelet* é função de θ_f , visto que os valores base da normalização utilizada foram diferentes. Portanto, o conteúdo de frequência dos transitórios de falta independe de θ_f , enquanto que a energia dos transitórios de falta é função de θ_f . Tais observações também foram identificadas por Johns *et al.* (1994) ao utilizar a TRF.

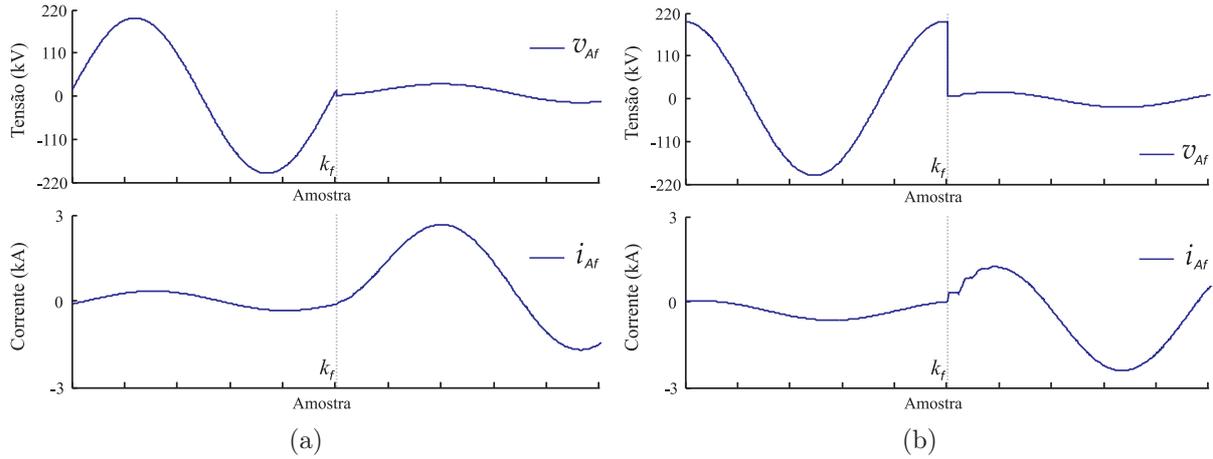


Figura 5.5. Influência do ângulo de incidência de uma falta AT, nas tensões e correntes no local da falta: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$.

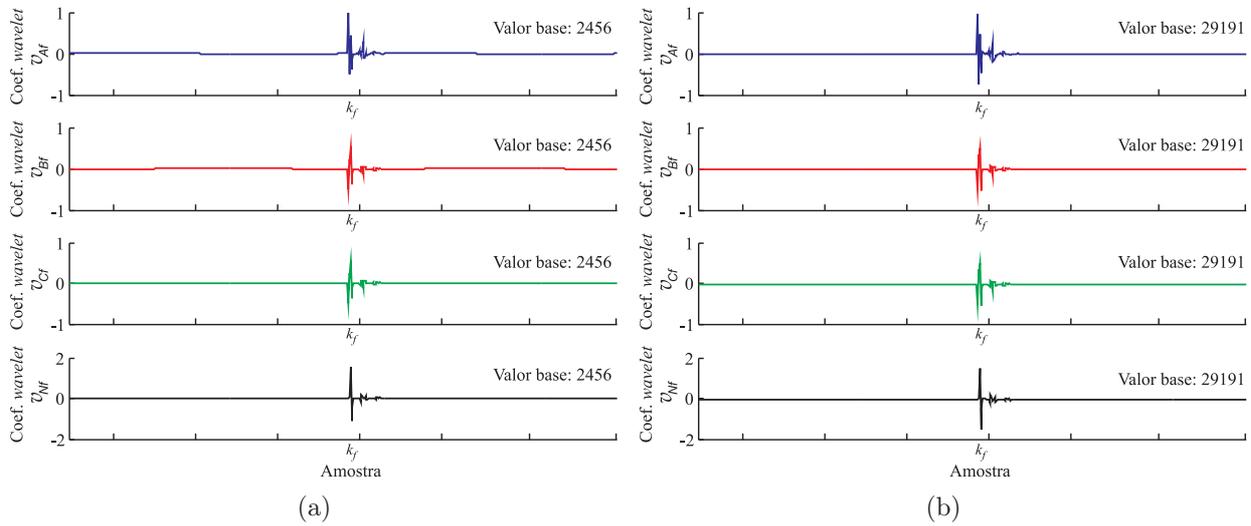


Figura 5.6. Coeficientes *wavelet* das tensões no local da falta AT, para: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$.

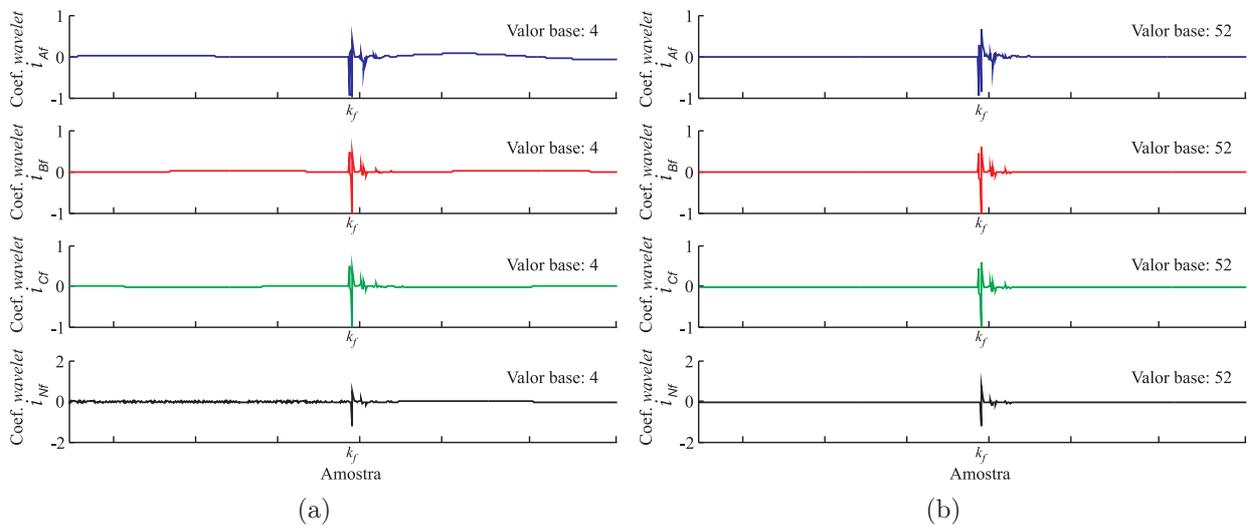


Figura 5.7. Coeficientes *wavelet* das correntes no local da falta AT, para: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$.

Na Figura 5.8 são ilustradas as energias $\mathcal{E}_{v_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Cf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Nf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$ referentes aos coeficientes *wavelet* relacionados aos transitórios de falta em um ciclo, de k_f a $k_f + \Delta k$, para as faltas AT, BT e CT simuladas. Após uma análise de regressão, fazendo uso do método de ajuste de curvas convencional Levenberg-Marquardt no *Curve Fitting Toolbox* do Matlab[®], constatou-se que

$$\mathcal{E}(\theta_f) = E_0 + E_1 \text{sen}^2(\theta_f + \delta_E), \quad (5.3)$$

em que $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_{v_{Af}}, \mathcal{E}_{v_{Bf}}, \mathcal{E}_{v_{Cf}}, \mathcal{E}_{v_{Nf}}, \mathcal{E}_{i_{Af}}, \mathcal{E}_{i_{Bf}}, \mathcal{E}_{i_{Cf}} \text{ e } \mathcal{E}_{i_{Nf}}\}$; E_0 e E_1 são constantes que dependem do local de falta, da resistência de falta, dos parâmetros do sistema elétrico, da *wavelet* mãe utilizada, da taxa de amostragem e do tamanho da janela para o cálculo das energias; $\delta_E = \{0^\circ, -120^\circ \text{ e } 120^\circ\} = \{\delta_A, \delta_B \text{ e } \delta_C\}$ para as faltas AT, BT e CT, respectivamente. As equações de energia, ilustradas na Figura 5.8, foram estimadas com $R^2 \approx 0,9998$, em que R^2 é o quadrado do coeficiente de correlação múltipla ou coeficiente de múltipla determinação.

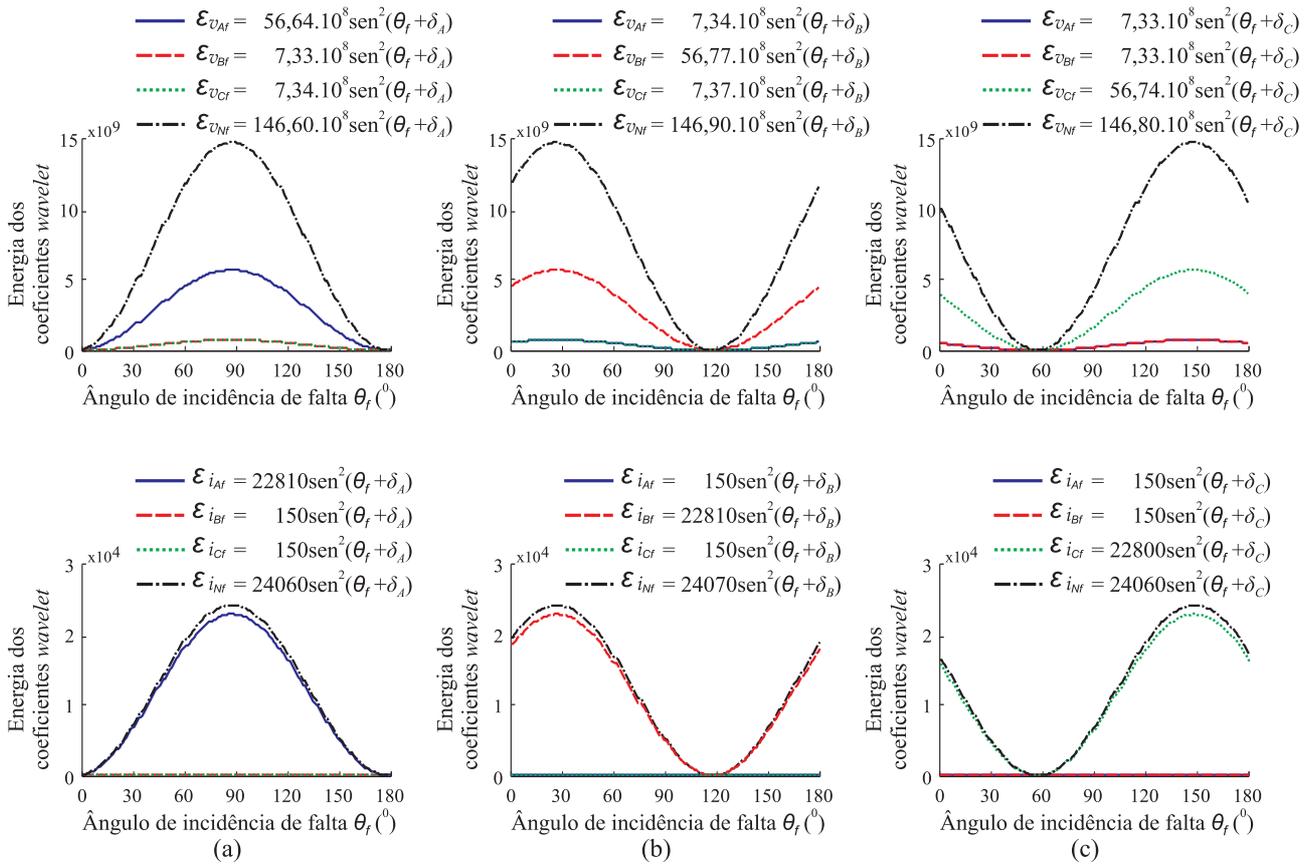


Figura 5.8. Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes, no local da falta: (a) falta AT; (b) falta BT; (c) falta CT.

De acordo com a Figura 5.8, as energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes no local da falta variam senoidalmente em função de θ_f . No entanto, as energias referentes às tensões e correntes envolvidas com a falta se destacam em relação às tensões e correntes das fases sãs, o que propicia a classificação de faltas pela análise das energias dos coeficientes *wavelet*. Além disto, o efeito do ângulo de incidência se repete a cada 180° , com pico de energia em todas as curvas em $\theta_f=90^\circ$, 30° e 150° nas faltas AT, BT e CT, respectivamente.

Observa-se também na Figura 5.8 que há um ângulo específico, para cada tipo de falta monofásica, para o qual não existem transitórios de falta ($\mathcal{E}_f=0$). Nestes casos, possivelmente, a detecção das faltas por meio da análise dos transitórios fica comprometida.

Além do ângulo de incidência, o local de falta em uma LT também é uma variável aleatória, sendo pouco provável, a medição das tensões e correntes no local de falta. Na prática, os RDPs são instalados em subestações para monitoramento das tensões e correntes nas extremidades das LTs. Por este motivo, as tensões e correntes, assim como as respectivas energias dos coeficientes *wavelet* do terminal local da LT (barra 1) do sistema da Figura 5.1 também foram avaliadas para cada tipo de falta.

Devido ao tempo de trânsito das ondas viajantes do local de falta até a barra 1 (τ), o instante inicial dos transitórios de falta na barra 1 é sempre maior que o instante real de ocorrência da falta. Como consequência, na barra 1, os transitórios de falta ocorrem em um ângulo de fase de $\theta_f+\beta$, em v_A , sendo β o ângulo de fase associado com o tempo de trânsito. Na Figura 5.9 é ilustrado o efeito do tempo de trânsito no instante de ocorrência dos transitórios nas tensões e correntes do local da falta e da barra 1, do sistema elétrico da Figura 5.1.

Na Figura 5.10 são apresentados os sinais v_{Af} e i_{Af} (Figura 5.5), assim como v_A e i_A durante as faltas AT com $\theta_f=3^\circ$ e $\theta_f=90^\circ$, respectivamente. A amostra k_1 está relacionada com o instante inicial da falta (instante inicial dos transitórios de falta) na barra 1, calculada como segue

$$k_1 \approx k_f + \text{int} \left(\frac{f_s d_f}{c} \right), \quad (5.4)$$

em que $\text{int}(\cdot)$ retorna um número inteiro correspondente ao argumento; c é a velocidade de propagação das ondas viajantes; $k_1 \geq k_f$.

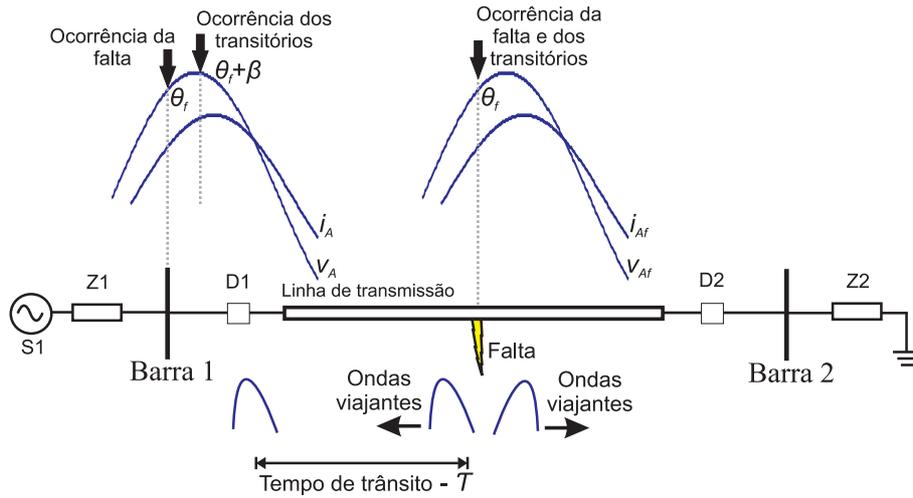


Figura 5.9. Tempo de trânsito das ondas viajantes do local de falta até a barra 1.

Como o esperado, na barra 1, os transitórios em v_A e i_A (Figura 5.10) também foram mais severos em $\theta_f=90^\circ$ e mais amortecidos em $\theta_f=3^\circ$. Os transitórios de falta em v_{Af} e v_A ocorrem em um ângulo de fase igual a θ_f e $\theta_f+\beta$ (nas amostras k_f e k_1), respectivamente, sendo β o defasamento devido ao tempo de trânsito, calculado por:

$$\beta = 360^\circ f\tau \approx 360^\circ f \frac{d_f}{c}. \tag{5.5}$$

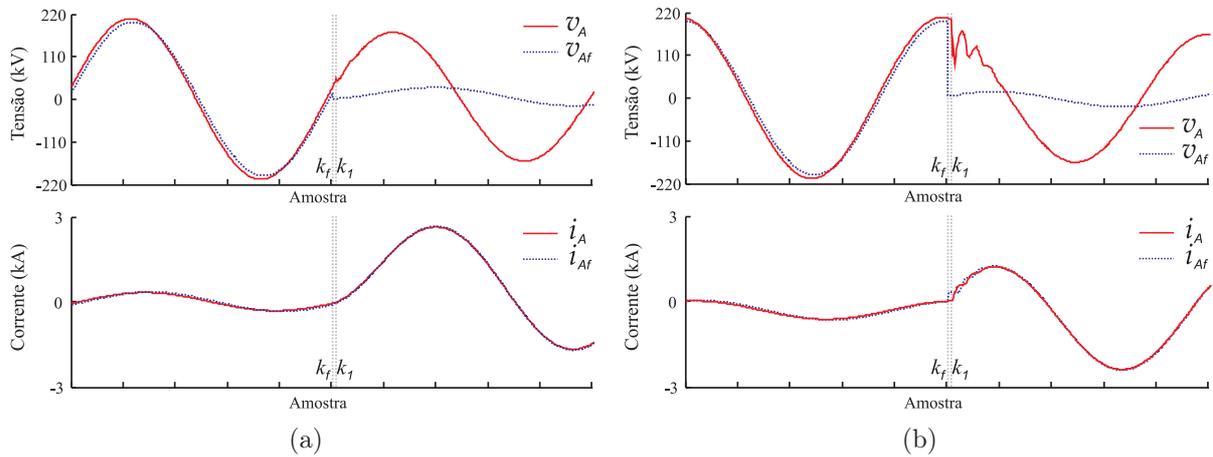


Figura 5.10. Influência do ângulo de incidência de uma falta AT, nas tensões e correntes no terminal da linha e no local da falta: (a) $\theta_f=3^\circ$; (b) $\theta_f=90^\circ$.

Na Figura 5.11 são ilustradas as energias $\mathcal{E}_{v_A}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_B}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_C}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_N}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_A}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_B}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_C}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_N}(\theta_f)$, calculadas em uma janela de um ciclo, de k_1 a $k_1+\Delta k$, contemplando os coeficientes *wavelet* relacionados aos transitórios de falta para as faltas AT, BT e CT simuladas.

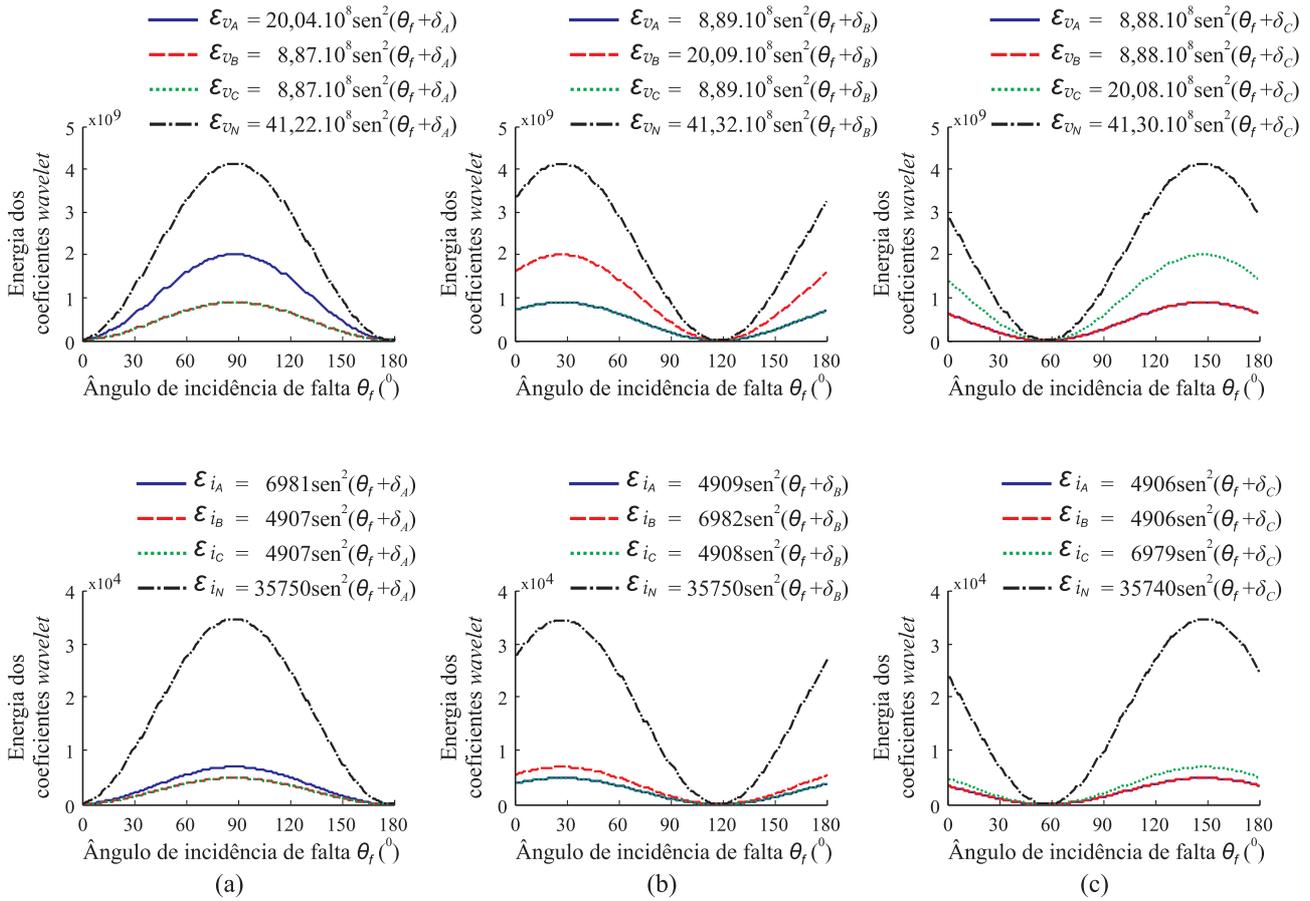


Figura 5.11. Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes na barra 1: (a) falta AT; (b) falta BT; (c) falta CT.

Após análise de regressão, fazendo uso do método de ajuste de curvas convencional Levenberg-Marquardt no *Curve Fitting Toolbox* do Matlab[®], constatou-se que a Equação 5.3 também é válida para as energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{v_N} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N} , apresentando as mesmas características de $\mathcal{E}_{v_{Af}}$, $\mathcal{E}_{v_{Bf}}$, $\mathcal{E}_{v_{Cf}}$, $\mathcal{E}_{v_{Nf}}$, $\mathcal{E}_{i_{Af}}$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}$:

- As energias relacionadas com as tensões e correntes envolvidas com a falta se destacam em relação às tensões e correntes das fases sãs.
- O pico de energia em todas as curvas ocorre em $\theta_f = \{90^\circ, 30^\circ \text{ e } 150^\circ\}$ nas faltas AT, BT e CT, ou seja, os transitórios mais severos não ocorrem no pico da tensão medida na barra 1, mas no pico da tensão no local da falta.

5.2.2 Faltas Bifásicas

De forma análoga ao caso monofásico, a energia dos transitórios em faltas bifásicas deve ser também função do ângulo de incidência nas tensões de linha envolvidas com a falta. Ao considerar o sistema equilibrado no período de pré-falta, a tensão de linha no local e instante de falta é

$$v_f(\theta_f) = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta + 30^\circ), \quad (5.6)$$

em que V é a tensão máxima de fase no local de falta; $\delta = \{\delta_A, \delta_B \text{ e } \delta_C\} = \{0^\circ, -120^\circ \text{ e } 120^\circ\}$ para $v_f = \{v_{ABf}, v_{BCf} \text{ e } v_{CAf}\}$, respectivamente.

A Equação 5.6 pode ser reescrita como segue:

$$v_{ABf}(\theta_f) = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_{AB}), \quad (5.7)$$

$$v_{BCf}(\theta_f) = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_{BC}), \quad (5.8)$$

$$v_{CAf}(\theta_f) = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_{CA}), \quad (5.9)$$

em que $\delta_{AB} = \delta_A + 30^\circ$; $\delta_{BC} = \delta_B + 30^\circ$; $\delta_{CA} = \delta_C + 30^\circ$.

Em uma falta AB, a tensão v_{ABf} é tomada como referência, sendo calculada por

$$v_{ABf} = v_{Af} - v_{Bf} = V \text{sen}(\theta_f) - V \text{sen}(\theta_f - 120^\circ), \quad (5.10)$$

ou

$$v_{ABf} = \frac{\sqrt{3}}{2}V \text{sen}(\theta_f + 30^\circ) - \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}V \text{sen}(\theta_f + 30^\circ) \right), \quad (5.11)$$

em que $\frac{\sqrt{3}}{2}V \text{sen}(\theta_f + 30^\circ)$ e $-\frac{\sqrt{3}}{2}V \text{sen}(\theta_f + 30^\circ)$ são as projeções dos vetores de v_{Af} e v_{Bf} na direção do vetor de v_{ABf} .

Conforme a Equação 5.11, as projeções dos vetores de v_{Af} e v_{Bf} na direção do vetor de v_{ABf} (referência para as faltas AB) apresentam amplitudes iguais e sentidos contrários no instante inicial da falta. Este fato pode ser observado na Figura 5.12, nos quais são apresentados os fasores de v_{Af} , v_{Bf} e v_{ABf} no instante de ocorrência das faltas AB com $\theta_f = 60^\circ$ e $\theta_f = 150^\circ$. Como consequência, os transitórios nas tensões (correntes) das fases A e B são iguais em módulo e com sinais invertidos, independente do valor de θ_f .

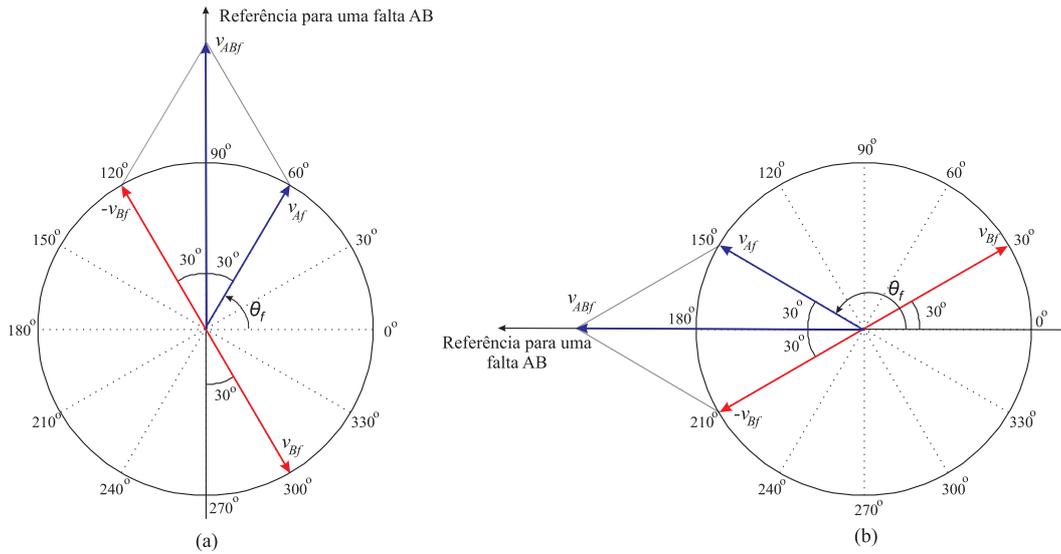


Figura 5.12. Fator v_{Af} , v_{Bf} e v_{ABf} no instante de ocorrência de uma falta AB: (a) $\theta_f=60^\circ$; (b) $\theta_f=150^\circ$.

Na ocorrência de uma falta bifásica, transitórios na tensão e corrente da fase são induzidos como consequência do acoplamento capacitivo e indutivo entre as fases da LT. O efeito do acoplamento entre as fases de uma LT em uma falta AB é ilustrado na Figura 5.13. Como os transitórios nas tensões das fases A e B são iguais em módulo e com sinais invertidos, os transitórios induzidos na tensão da fase C se cancelam devido à superposição das ondas viajantes, ao considerar a LT idealmente transposta. Além disto, os transitórios na tensão de neutro são nulos, visto que $v_{Nf}=v_{Af}+v_{Bf}+v_{Cf}$. O mesmo comportamento é válido para as correntes. Portanto, as energias dos transitórios de falta (energia dos coeficientes *wavelet*) das correntes e tensões envolvidas com a falta devem ser influenciadas por θ_f , enquanto que as energias dos transitórios da corrente e tensão da fase são e do neutro devem ser nulas durante a falta.

Ao fazer uma analogia com as faltas monofásicas, o pior caso em ambos os sinais (tensões e correntes) envolvidos com a falta bifásica é observado quando a falta ocorre no valor máximo da tensão de linha, ou seja, quando

$$\theta_f + \delta = 60^\circ \pm n180^\circ, \tag{5.12}$$

em que $n=\{0,1,2,\dots\}$. Desta forma, os transitórios em faltas AB, BC e AC devem ser mais severos quando $\theta_f=60^\circ$, $\theta_f=0^\circ$ e $\theta_f=120^\circ$, respectivamente.

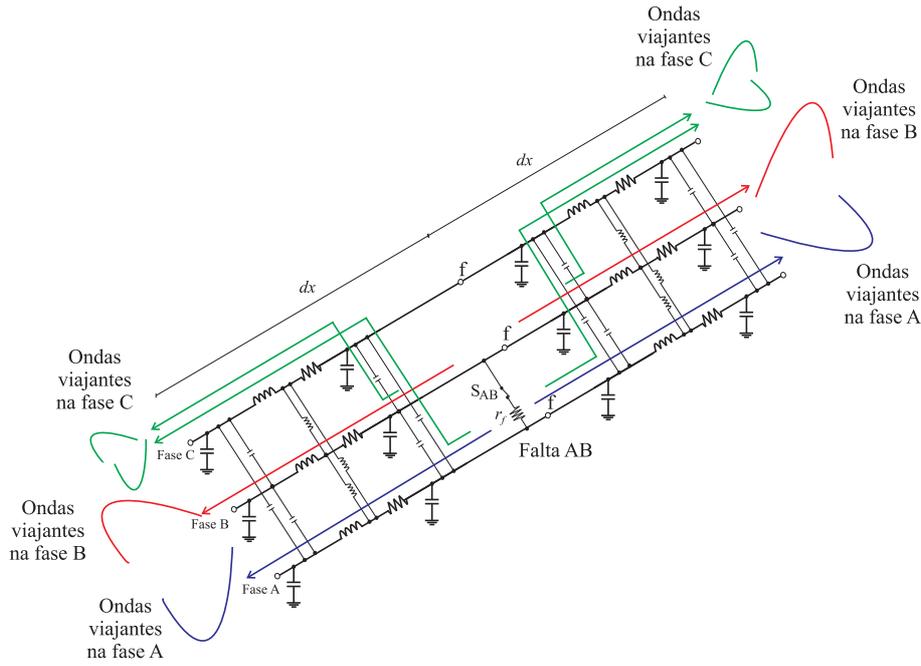


Figura 5.13. Ondas viajantes que se propagam na LT em uma falta AB.

Na Figura 5.14 são ilustradas as energias $\mathcal{E}_{v_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Cf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Nf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$, calculadas no primeiro ciclo de falta, entre k_f e $k_f + \Delta k$, para as faltas AB, BC e AC simuladas. As equações das energias foram estabelecidas por meio da análise de regressão, fazendo uso do método de ajuste de curvas convencional Levenberg-Marquardt no *Curve Fitting Toolbox* do Matlab[®], no qual se constatou que a Equação 5.3 também é válida para as faltas bifásicas.

De acordo com a Figura 5.14, as energias dos coeficientes *wavelet* no local da falta referentes às fases envolvidas com a falta são aproximadamente iguais e variam senoidalmente em função de θ_f , enquanto que as energias referentes à fase sã e o neutro são nulas. Além disto, o efeito do ângulo de incidência se repete a cada 180° , com pico de energia em $\theta_f = \{60^\circ, 0^\circ \text{ e } 120^\circ\}$ nas faltas AB, BC e AC, respectivamente. Comportamento análogo foi verificado nas energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{v_N} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N} .

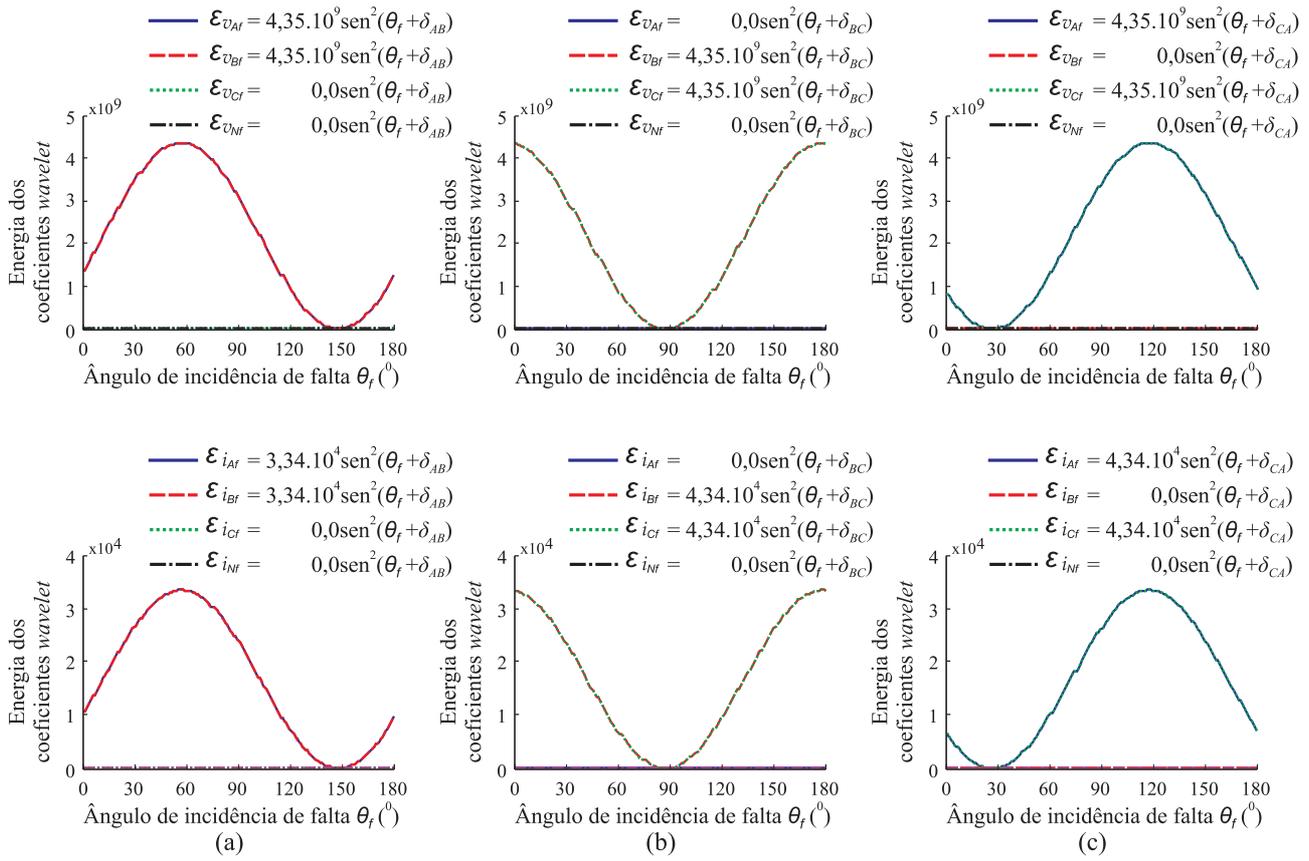


Figura 5.14. Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes, no local de falta: (a) falta AB; (b) falta BC; (c) falta AC.

5.2.3 Faltas Bifásicas para Terra

Na Figura 5.15 são ilustradas as energias $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$, calculadas no primeiro ciclo das faltas, entre k_f e $k_f + \Delta k$, para as faltas ABT, BCT e ACT simuladas. As equações das energias foram estabelecidas após uma análise de regressão, fazendo uso do método de ajuste de curvas convencional Levenberg-Marquardt no *Curve Fitting Toolbox* do Matlab[®], e se constatou que a Equação 5.3 também é válida para as faltas bifásicas para terra. Porém, diferentemente das faltas monofásicas e bifásicas, o valor máximo de $\mathcal{E}_{i_{Af}}$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}$ ocorre em diferentes ângulos de incidência. Comportamento similar foi observado para as tensões no local da falta.

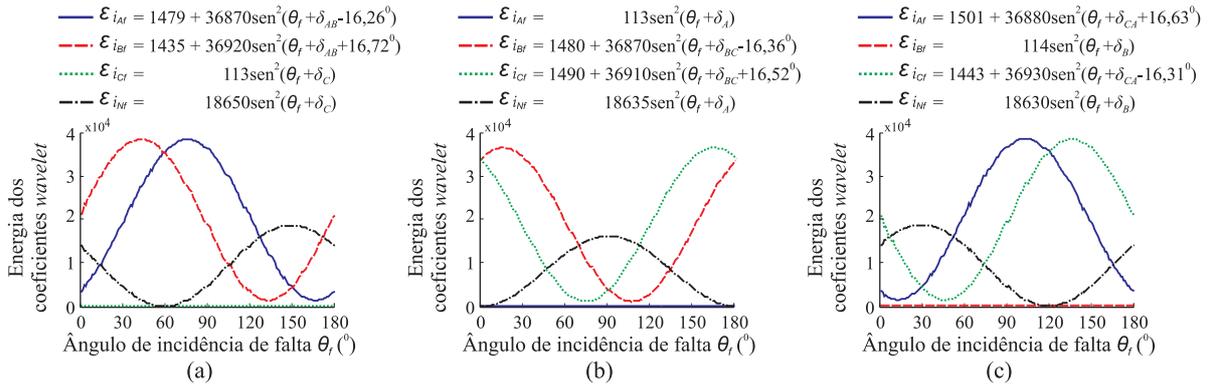


Figura 5.15. Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das correntes, no local de falta: (a) falta ABT; (b) falta BCT; (c) falta ACT.

Na Figura 5.16 é apresentado o esquema de simulação das faltas ABT (TLEIS, 2008). Nesta tese, apenas para uma melhor compreensão do comportamento dos transitórios das faltas ABT, as ondas viajantes são consideradas como sendo decorrentes de faltas AT, BT e AB, ocorrendo no mesmo instante e local. No entanto, mesmo admitindo que os transitórios da falta ABT sejam resultantes das respectivas faltas AB, AT e BT, a energia dos transitórios da falta ABT é diferente da soma da energia dos transitórios das faltas AB, AT e BT. Por conseguinte, $\mathcal{E}^{ABT} \neq \mathcal{E}^{AT} + \mathcal{E}^{BT} + \mathcal{E}^{AB}$. Mesmo assim, a comparação de \mathcal{E}^{ABT} com as energias \mathcal{E}^{AT} , \mathcal{E}^{BT} e \mathcal{E}^{AB} torna-se útil no que concerne à verificação do comportamento dos transitórios em uma falta ABT. Na Figura 5.17 são ilustradas as energias obtidas nas faltas AT, BT, AB e ABT, com $r_f=10 \Omega$.

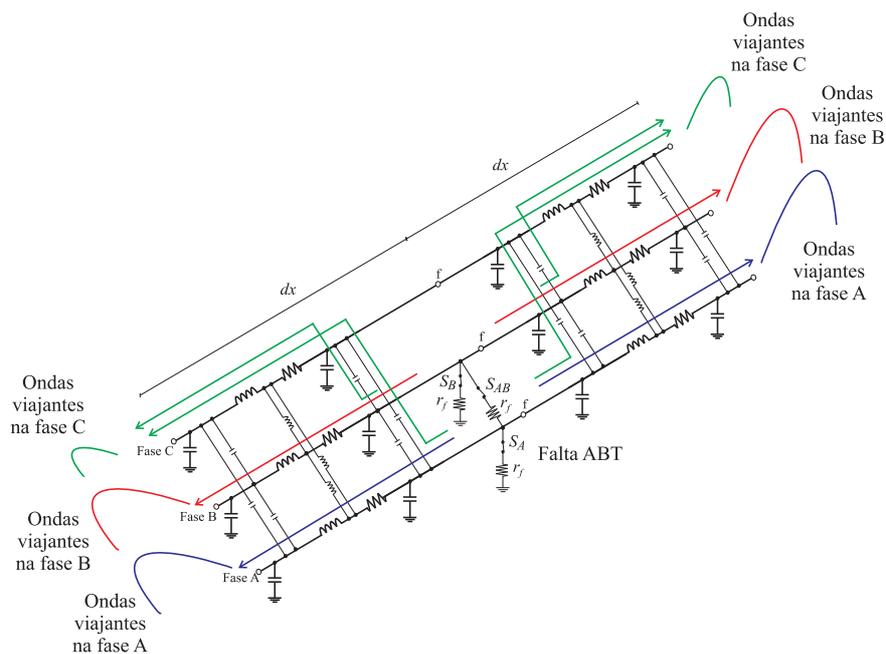


Figura 5.16. Ondas viajantes que se propagam na LT em uma falta ABT.

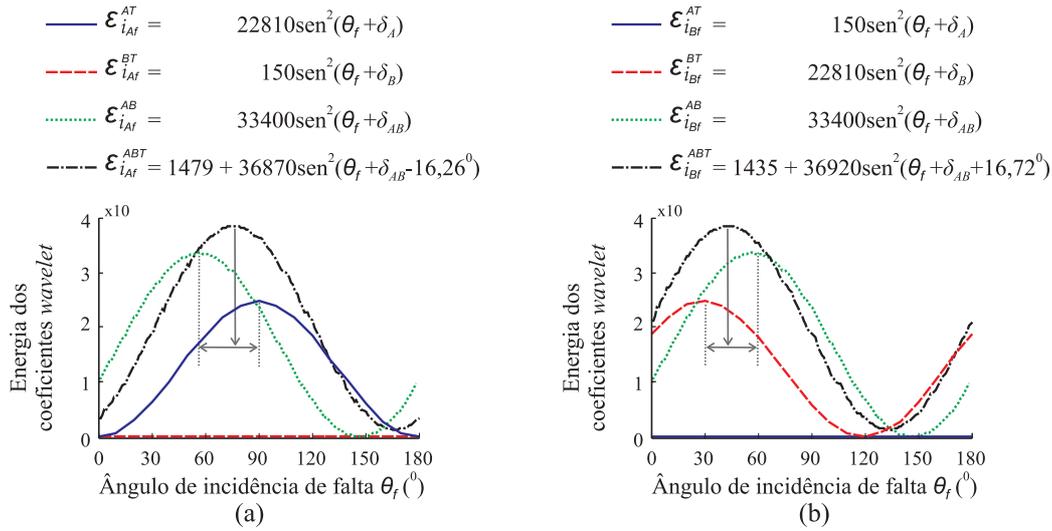


Figura 5.17. Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das correntes, no local de falta, nas faltas AT, BT, AB e ABT: (a) $\mathcal{E}_{i_{Af}}$; (b) $\mathcal{E}_{i_{Bf}}$.

Com relação à fase A (Figura 5.17(a)), o valor máximo das energias $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{AT}$, $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{BT}$ e $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{AB}$ ocorre em $\theta_f=90^\circ$, $\theta_f=30^\circ$ e $\theta_f=60^\circ$, respectivamente. Os transitórios na fase A devido à contribuição da falta BT, decorrentes do acoplamento eletromagnético entre as fases A e B, podem ser desprezados, quando comparados com a contribuição das faltas AT e AB. Se a ligação entre as fases A e B não existisse, o valor máximo de $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT}$ tenderia a ocorrer em 90° ($\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT} \rightarrow \mathcal{E}_{i_{Af}}^{AT}$), enquanto que, se a ligação entre a fase A e a terra não existisse, o valor máximo de $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT}$ tenderia a ocorrer em 60° ($\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT} \rightarrow \mathcal{E}_{i_{Af}}^{AB}$). Portanto, o valor máximo de $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT}$ deve ocorrer entre 60° e 90° . A energia $\mathcal{E}_{i_{Bf}}^{ABT}$ apresenta comportamento similar à energia $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT}$. No entanto, seu valor máximo deve ocorrer entre 30° e 60° . Portanto, conclui-se que os valores máximos de $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT}$ e $\mathcal{E}_{i_{Bf}}^{ABT}$ ocorrem em ângulos equidistantes e próximos de 60° (ângulo em que ocorre os valores máximos de $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{AB}$ e $\mathcal{E}_{i_{Bf}}^{AB}$) e o comportamento transitório de uma falta ABT é intimamente relacionado com o comportamento transitório de uma falta AB.

Diferentemente das faltas AB, a energia $\mathcal{E}_{i_{Cf}}^{ABT} \neq 0$ é consequência direta da participação da terra na falta, o que resulta em transitórios induzidos na fase C. Porém, à medida que $\theta_f \rightarrow 60^\circ$, tem-se $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT} \approx \mathcal{E}_{i_{Bf}}^{ABT}$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}^{ABT} \approx 0$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}^{ABT} \approx 0$ (Figura 5.16). Portanto, do ponto de vista dos transitórios, uma falta ABT com $\theta_f=60^\circ$ comporta-se como uma falta AB.

Independente do valor de θ_f , uma das faltas AT, BT e AB sempre irá apresentar transitórios nas fases A e B. Como consequência, $E_0 \neq 0$ nas energias $\mathcal{E}_{i_{Af}}^{ABT}$ e $\mathcal{E}_{i_{Bf}}^{ABT}$. Portanto, em uma falta bifásica para a terra sempre há ocorrência de transitórios de falta, independente de θ_f .

As energias dos coeficientes *wavelet* na barra 1 apresentaram comportamento similar às energias no local da falta.

5.2.4 Faltas Trifásicas

Na Figura 5.18 são ilustradas as energias $\mathcal{E}_{v_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Cf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Nf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$, calculadas no primeiro ciclo após a falta, entre k_f e $k_f + \Delta k$, para as faltas ABC simuladas. As equações das energias foram estabelecidas após uma análise de regressão, fazendo uso do método de ajuste de curvas convencional Levenberg-Marquardt no *Curve Fitting Toolbox* do Matlab[®], no qual se constatou que a Equação 5.3 também é válida para as faltas trifásicas.

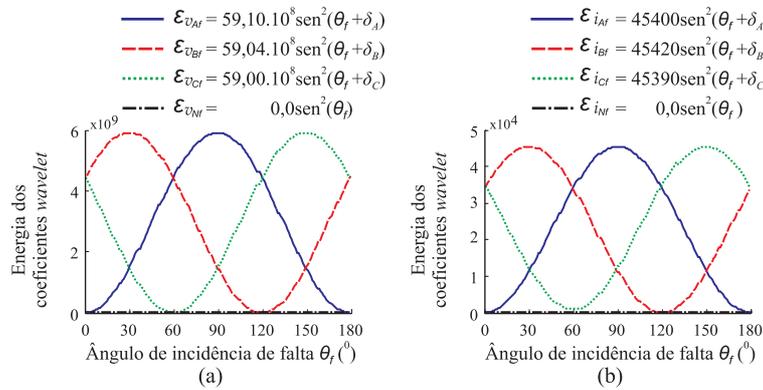


Figura 5.18. Efeito do ângulo de incidência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das faltas trifásicas, no local de falta: (a) $\mathcal{E}_{v_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{v_{Nf}}(\theta_f)$; (b) $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$.

De acordo com a Figura 5.18, as energias dos coeficientes *wavelet* no local da falta referentes às tensões e correntes de fase variam senoidalmente em função de θ_f . Além disto, o efeito do ângulo de incidência se repete a cada 180°, com valor máximo de energia em $\theta_f = \{90^\circ, 30^\circ$ e $150^\circ\}$ para as fases A, B e C, respectivamente. Comportamento análogo foi verificado nas energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{v_N} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N} .

De acordo com a Figura 5.18, uma falta trifásica apresenta transitórios nas tensões e correntes em pelo menos duas fases para qualquer valor de θ_f . Por outro lado, dependendo do valor de θ_f , os transitórios de uma falta trifásica podem se comportar de forma semelhante aos transitórios de uma falta bifásica. Por exemplo, em $\theta_f \rightarrow 60^\circ$, como nas faltas ABT, os transitórios das faltas ABC são similares aos transitórios de uma falta AB, visto que $\mathcal{E}_{v_A} \rightarrow \mathcal{E}_{v_B}$ e $\mathcal{E}_{v_C} \rightarrow 0$ e $\mathcal{E}_{v_N} \rightarrow 0$.

5.2.5 Efeito da *Wavelet* Mãe

Dentre as diversas *wavelets*, a família das *wavelet* Daubechies, em especial a db4, se destaca em métodos de detecção e classificação de distúrbios (BRITO *et al.*, 1998; KIM; AGGARWAL, 2001). A influência das *wavelets* db4, db6, db8, db10 e db12 nas energias $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$ referentes aos transitórios de falta em um ciclo, de k_f a $k_f + \Delta k$, para as faltas AT simuladas é ilustrada na Figura 5.19. Após uma análise de regressão, constatou-se que o comportamento das energias é o mesmo para todas as *wavelets* avaliadas.

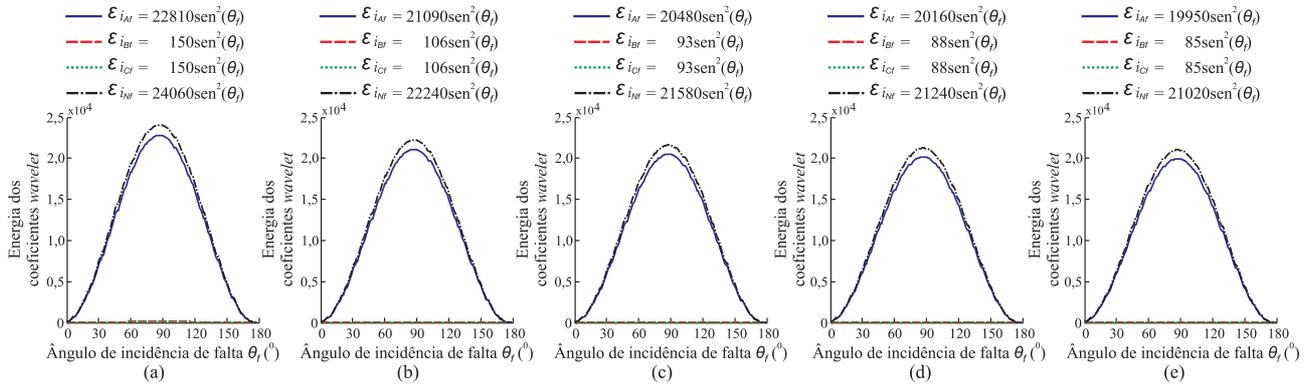


Figura 5.19. Efeito da *wavelet* mãe nas energias dos coeficientes *wavelet* das correntes, no local das faltas AT: (a) db4; (b) db6; (c) db8; (d) db10; (e) db12.

De acordo com a Figura 5.19, as energias calculadas com a db4 apresentaram amplitudes maiores que as demais. Nos casos em que os transitórios são mais amortecidos ($\theta_f \rightarrow 0^\circ$ em faltas AT), a detecção das faltas com as energias calculadas com a db4 pode apresentar vantagens quando comparada com as outras *wavelets* Daubechies. Constatou-se também, que as amplitudes de $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$ (energias relacionadas às correntes de falta) são bem expressivas em relação às amplitudes de $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ para todas as *wavelets*. Portanto, as *wavelets* citadas são igualmente adequadas à classificação de faltas. Por fim, como os filtros *wavelet* e escala da db4 possuem apenas quatro coeficientes, a db4 torna-se uma *wavelet* mais apropriada em aplicações em tempo real (COSTA *et al.*, 2010b).

Após avaliação das energias dos coeficientes *wavelet* das correntes e tensões, no local e na barra 1, em todos os tipos de falta, verificou-se que, dentre as *wavelets* da família Daubechies, a db4 é a que melhor se adequa à análise em tempo real das energias para detecção e classificação de faltas nesta tese.

5.2.6 Efeito da Escala *Wavelet*

Na Figura 5.20 são ilustradas as energias $\mathcal{E}_{i_{Af}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(\theta_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(\theta_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(\theta_f)$, referentes aos transitórios de falta em um ciclo, de k_f a $k_f + \Delta k$, para as faltas AT, nas escalas 1, 2, 3 e 4. Após análise de regressão, constatou-se que as energias dos coeficientes *wavelet* das quatro primeiras escalas variam senoidalmente em função do ângulo de incidência de falta, com valor máximo em $\theta_f = 90^\circ$. Como discutido na Seção 3.8, conclui-se que as energias das componentes de frequência dos transitórios de falta ao longo do espectro de frequência apresentam o mesmo comportamento das energias dos coeficientes *wavelet* da primeira escala, discutido neste capítulo.

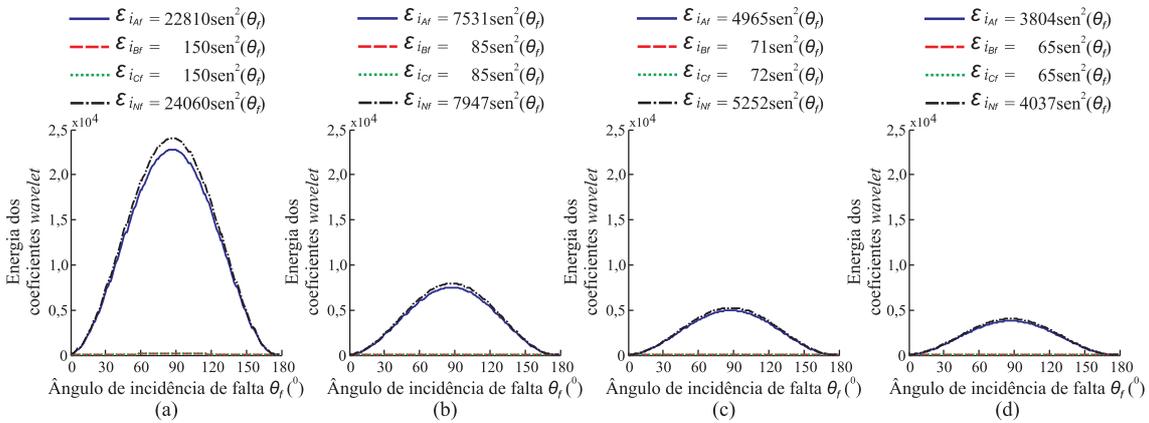


Figura 5.20. Efeito da escala *wavelet* nas energias dos coeficientes *wavelet* das correntes, no local das faltas AT: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala; (d) quarta escala.

De acordo com a Figura 5.20, as energias calculadas na primeira escala apresentaram maior amplitude que as demais. Para os casos em que os transitórios são mais amortecidos ($\theta_f \rightarrow 0^\circ$ em faltas AT), a detecção das faltas com as energias calculadas na primeira escala é mais adequada quando comparada as energias calculadas em outras escalas. Após avaliação das energias dos coeficientes *wavelet* das correntes e tensões, no local e na barra 1, em todos os tipos de falta, verificou-se que a primeira escala *wavelet* é a mais adequada à análise em tempo real das energias para detecção e classificação de faltas.

5.3 INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE FALTA NA ENERGIA DOS TRANSITÓRIOS

Para avaliação do efeito da resistência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet*, as faltas AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT e ABC foram simuladas no sistema da Figura 5.1, com $d_f = 90$ km da barra 1, $r_f = \{1, 2, \dots, 100\} \Omega$ e $\theta_f = 45^\circ$. A duração de cada falta foi de aproximadamente 7 ciclos. Ao final, foram realizadas 1000 simulações no RTDS[®],

no qual foram obtidas as tensões e correntes no local da falta (v_{Af} , v_{Bf} , v_{Cf} , v_{Nf} , i_{Af} , i_{Bf} , i_{Cf} e i_{Nf}) e as tensões e correntes na barra 1 (v_A , v_B , v_C , v_N , i_A , i_B , i_C e i_N), com taxa de amostragem de 20000 amostras/s.

Na Figura 5.21 são ilustradas as tensões e correntes no local de falta (v_{Af} , v_{Bf} , v_{Cf} , i_{Af} , i_{Bf} e i_{Cf}), para duas faltas AT com $r_f=10 \Omega$ e $r_f=90 \Omega$, respectivamente. Ao contrário de θ_f , a resistência influencia sobremaneira a amplitude da corrente e tensão de falta do regime permanente de falta, no qual a sobrecorrente e o afundamento de tensão diminuem com o aumento da resistência. Além disto, a amplitude e o decaimento da componente DC e dos transitórios de falta diminuem com o aumento de r_f .

Na Figura 5.22 são ilustradas as energias $\mathcal{E}_{v_{Af}}(r_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Bf}}(r_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Cf}}(r_f)$, $\mathcal{E}_{v_{Nf}}(r_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Af}}(r_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}(r_f)$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}(r_f)$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}(r_f)$, referentes aos coeficientes *wavelet* dos transitórios de falta em um ciclo, de k_f a $k_f+\Delta k$, para as faltas AT, AB e ABC simuladas. Após análise de regressão, fazendo uso do método de ajuste de curvas convencional Levenberg-Marquardt no *Curve Fitting Toolbox* do Matlab[®], constatou-se que

$$\mathcal{E}(r_f) = E_r e^{-r_f/\tau_r}, \quad (5.13)$$

em que $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_{v_{Af}}, \mathcal{E}_{v_{Bf}}, \mathcal{E}_{v_{Cf}}, \mathcal{E}_{v_{Nf}}, \mathcal{E}_{i_{Af}}, \mathcal{E}_{i_{Bf}}, \mathcal{E}_{i_{Cf}} \text{ e } \mathcal{E}_{i_{Nf}}\}$; τ_r é uma constante relacionada com o decaimento exponencial; E_r é uma constante que depende do local de falta, do ângulo de incidência da falta, dos parâmetros do sistema elétrico, da *wavelet* mãe utilizada e do tamanho da janela para o cálculo das energias. As equações de energia (Figura 5.22) foram estimadas com $R^2 \approx 0,9998$, em que R^2 é o quadrado do coeficiente de correlação múltipla.

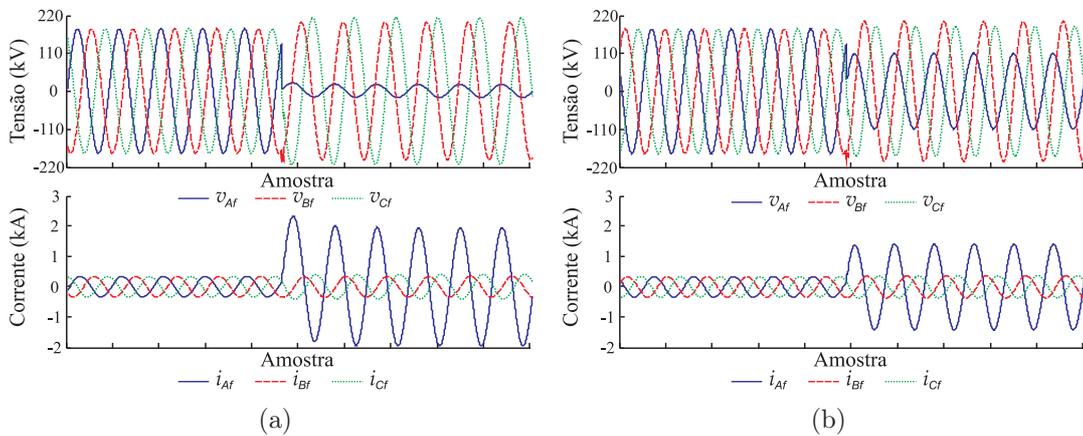


Figura 5.21. Influência da resistência de uma falta AT, nas tensões e correntes no local da falta: (a) 10 Ω ; (b) 90 Ω .

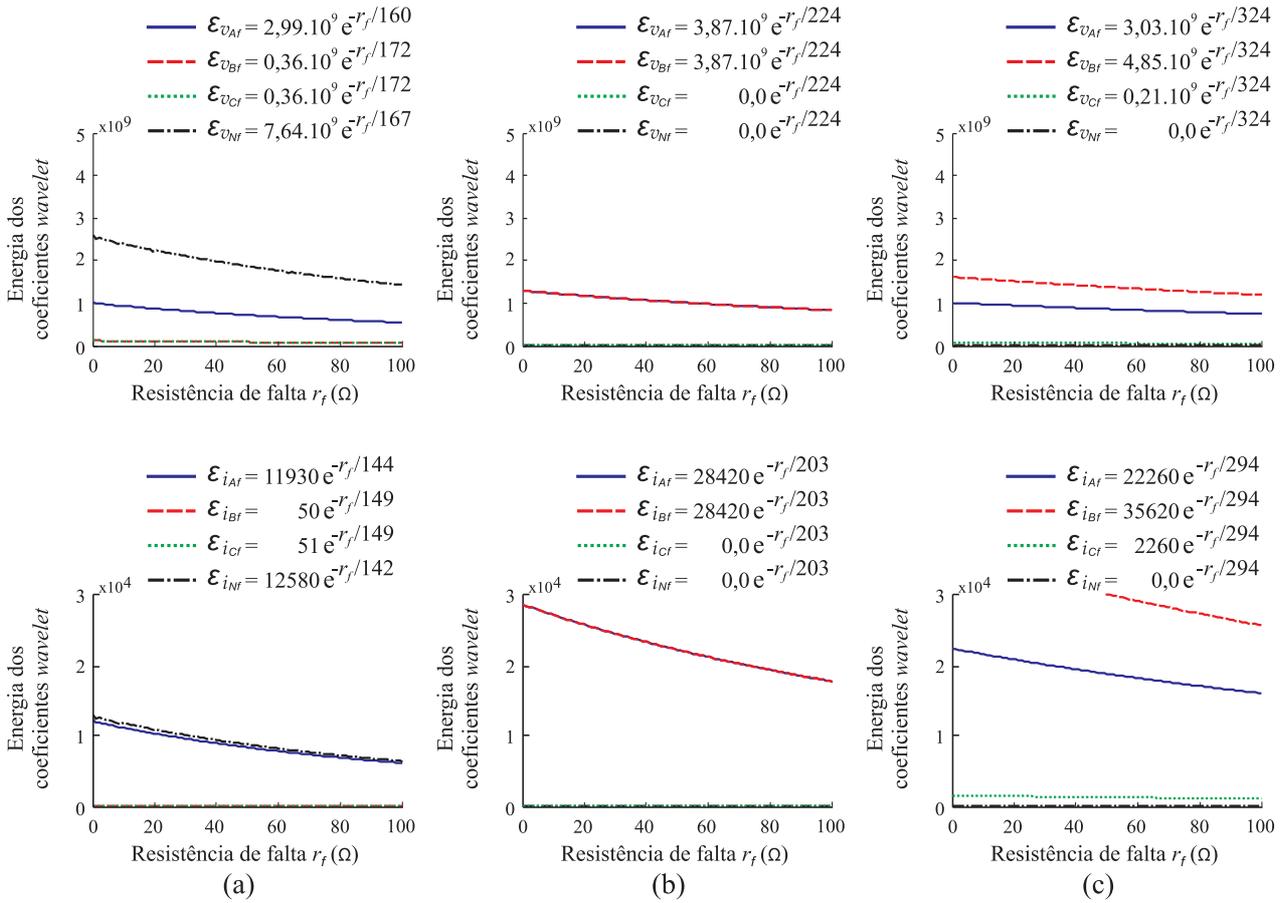


Figura 5.22. Efeito da resistência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes no local de falta: (a) falta AT; (b) falta AB; (c) falta ABC.

De acordo com a Figura 5.22, os valores de energia diminuem exponencialmente com o aumento de r_f , com taxa de decaimento τ_r semelhante. Com isso, o método de classificação de faltas que se baseia na análise comparativa das energias dos coeficientes *wavelet* das correntes, discutido mais adiante, torna-se praticamente independente da resistência de falta. Com relação à detecção de faltas, mesmo em altas resistências, as energias relacionadas às correntes de falta apresentam amplitudes comparáveis com as de baixa resistência, propiciando a detecção nos casos com resistências altas.

Após avaliação das energias dos coeficientes *wavelet* das correntes e tensões, no local e na barra 1, em todos os tipos de falta, verificou-se que as energias dos coeficientes *wavelet* apresentam comportamento conforme a Equação 5.13.

5.4 COORDENADAS DE FALTA

Conforme o Capítulo 4, as energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} no período correspondente ao regime permanente apresentam valores aleatórios devido à presença de ruídos de alta frequência. No entanto, na ocorrência da falta, os valores de \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} aumentam abruptamente devido à incidência dos transitórios. Na Figura 5.23 são ilustradas as correntes i_A , i_B e i_C , assim como as respectivas curvas de energia \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} de um registro oscilográfico real com falta do tipo CT (Figuras 4.10 e 4.11), destacando as amostras de energia em meio ciclo após o instante inicial da falta, ou seja, em $k=k_{2E}+\Delta k/2$.

As variáveis A , B , C e N são as energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N} normalizadas, denominadas coordenadas de falta. Em uma amostra k , têm-se:

$$A = \mathcal{E}_{i_A} / (\mathcal{E}_{i_A} + \mathcal{E}_{i_B} + \mathcal{E}_{i_C}), \quad (5.14)$$

$$B = \mathcal{E}_{i_B} / (\mathcal{E}_{i_A} + \mathcal{E}_{i_B} + \mathcal{E}_{i_C}), \quad (5.15)$$

$$C = \mathcal{E}_{i_C} / (\mathcal{E}_{i_A} + \mathcal{E}_{i_B} + \mathcal{E}_{i_C}), \quad (5.16)$$

$$N = \mathcal{E}_{i_N} / (\mathcal{E}_{i_A} + \mathcal{E}_{i_B} + \mathcal{E}_{i_C}), \quad (5.17)$$

sendo $A+B+C=1$ (equação de um plano); $0 \leq A \leq 1$; $0 \leq B \leq 1$; $0 \leq C \leq 1$; $N \geq 0$.

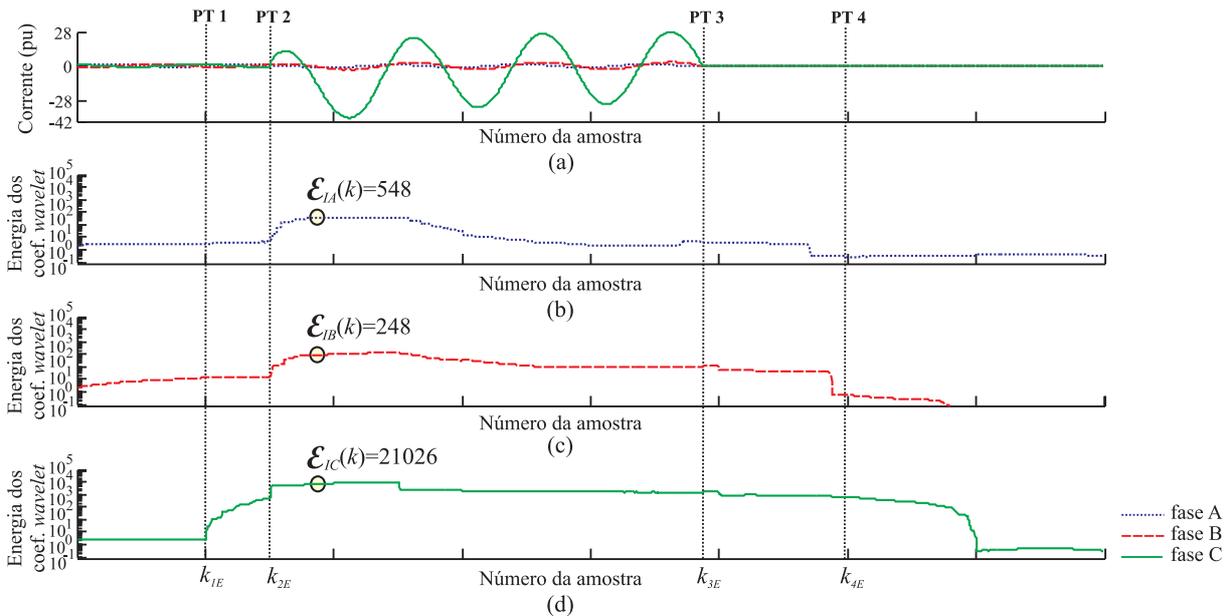


Figura 5.23. Registro oscilográfico real com falta CT: (a) i_A , i_B e i_C ; (b) \mathcal{E}_{i_A} ; (c) \mathcal{E}_{i_B} ; (d) \mathcal{E}_{i_C} .

Nas energias¹ ilustradas na Figura 5.23, em $k=k_{2E}+\Delta k/2$ (meio ciclo após a falta), têm-se $\mathcal{E}_{i_A}=548$, $\mathcal{E}_{i_B}=248$ e $\mathcal{E}_{i_C}=21026$, o que resulta em $A=0,03$, $B=0,01$ e $C=0,96$, respectivamente. Com relação à corrente de neutro, tem-se $\mathcal{E}_{i_N}=28562$, o que resulta em $N=1,32$.

As variáveis A , B e C , em uma amostra k , são as coordenadas de um sistema cartesiano tridimensional, composto pelos eixos A , B e C , perpendiculares entre si (Figura 5.24). A região no espaço ABC que contempla todos os valores possíveis para A , B e C de uma falta, é denominado triângulo de faltas e corresponde a um triângulo isósceles, com os vértices nos eixos A , B e C .

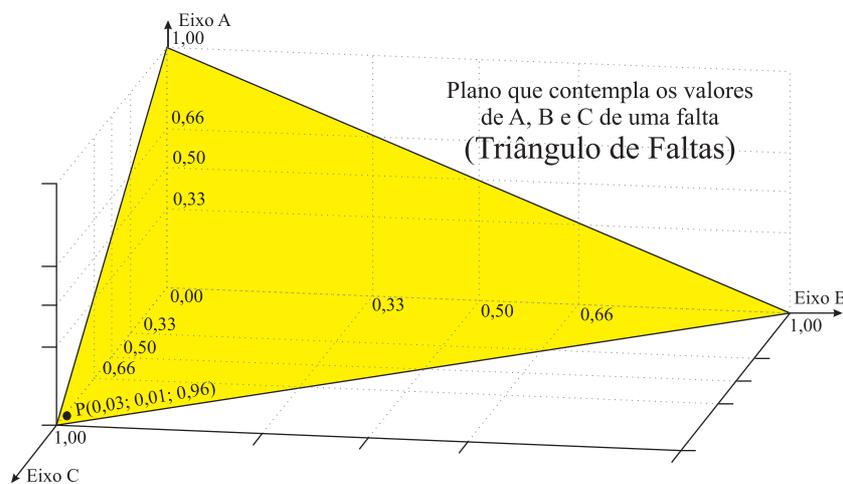


Figura 5.24. Triângulo de faltas.

As correntes envolvidas com a falta normalmente apresentam transitórios mais severos que as correntes sãs. Como consequência, uma falta monofásica do tipo CT, por exemplo, deve apresentar coordenadas de falta com a componente C mais significativa. Destaca-se na Figura 5.24, o ponto relacionado às coordenadas de falta ($A=0,03$; $B=0,01$; $C=0,96$), calculadas nas curvas de energia da Figura 5.23, em $k=k_{2E}+\Delta k/2$. Neste caso, as coordenadas da falta CT aproximam-se do vértice do triângulo no eixo C .

Conforme esperado, a localização das coordenadas de falta depende do tipo de falta. Mapeando as regiões referentes a cada tipo de falta, a classificação da falta fazendo uso das coordenadas de falta é feita de forma automática. Para identificação das regiões relacionadas às faltas monofásicas e bifásicas, considera-se que uma falta monofásica do tipo AT, por exemplo, apresente coordenadas com $A>B>C$ ou $A>C>B$. Considere que uma falta com $A>B>C$

¹As curvas de energias apresentadas na Figura 5.23 encontram-se em escala logarítmica e não se percebe, visualmente, a diferença da ordem de grandeza entre os valores de \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} .

seja do tipo AT se o valor intermediário for mais próximo do menor valor, ou seja, $A-B > B-C$. Sabendo que $A+B+C=1$, então, após algumas operações algébricas, obtêm-se $B < 1/3$ (valor intermediário menor que 0,33). Caso o valor de B seja mais próximo de A , ou seja, $A-B < B-C$, tem-se a uma falta bifásica envolvendo as fases A e B e $B \geq 1/3$. Seguindo o mesmo procedimento, as possíveis combinações entre as variáveis A , B e C que conduzem aos diversos tipos de faltas monofásicas e bifásicas foram identificadas, conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Valores das coordenadas de falta em função do tipo de falta.

Condição 1	Condição 2	Tipo de falta
$A > B > C$	$B < 0,33$	Falta AT
	$B \geq 0,33$	Falta AB
$A > C > B$	$C < 0,33$	Falta AT
	$C \geq 0,33$	Falta AC
$B > A > C$	$A < 0,33$	Falta BT
	$A \geq 0,33$	Falta AB
$B > C > A$	$C < 0,33$	Falta BT
	$C \geq 0,33$	Falta BC
$C > B > A$	$B < 0,33$	Falta CT
	$B \geq 0,33$	Falta BC
$C > A > B$	$A < 0,33$	Falta CT
	$A \geq 0,33$	Falta AC

Na Figura 5.25(a) são ilustradas as regiões geométricas no espaço ABC, correspondentes à equação do plano $A+B+C=1$, cujas condições foram explicitadas na Tabela 5.3, nos campos referentes às faltas monofásicas. Em uma falta do tipo AT, as coordenadas de falta devem estar localizadas na região correspondente ao plano AT. No entanto, a projeção desta região no espaço BC (Figura 5.25(b)) indica que em uma falta AT, têm-se $B < 1/3$ e $C < 1/3$. Fazendo a projeção das regiões hachuradas nos espaços AB e AC, obtêm-se $A < 1/3$ e $B < 1/3$ para uma falta CT e $A < 1/3$ e $C < 1/3$ para uma falta BT, respectivamente.

Na Figura 5.26(a) são ilustradas as regiões geométricas no espaço ABC, correspondentes à equação do plano $A+B+C=1$, cujas condições foram explicitadas na Tabela 5.3, nos campos referentes às faltas bifásicas. Em uma falta do tipo BC, as coordenadas de falta devem estar localizadas na região correspondente ao plano BC. No entanto, a projeção desta região no espaço BC (Figura 5.26(b)) indica que em uma falta BC, têm-se $B \geq 1/3$ e $C \geq 1/3$. Fazendo a projeção das regiões hachuradas nos espaços AB e AC, obtêm-se $A \geq 1/3$ e $B \geq 1/3$ para uma falta AB e $A \geq 1/3$ e $C \geq 1/3$ para uma falta AC, respectivamente.

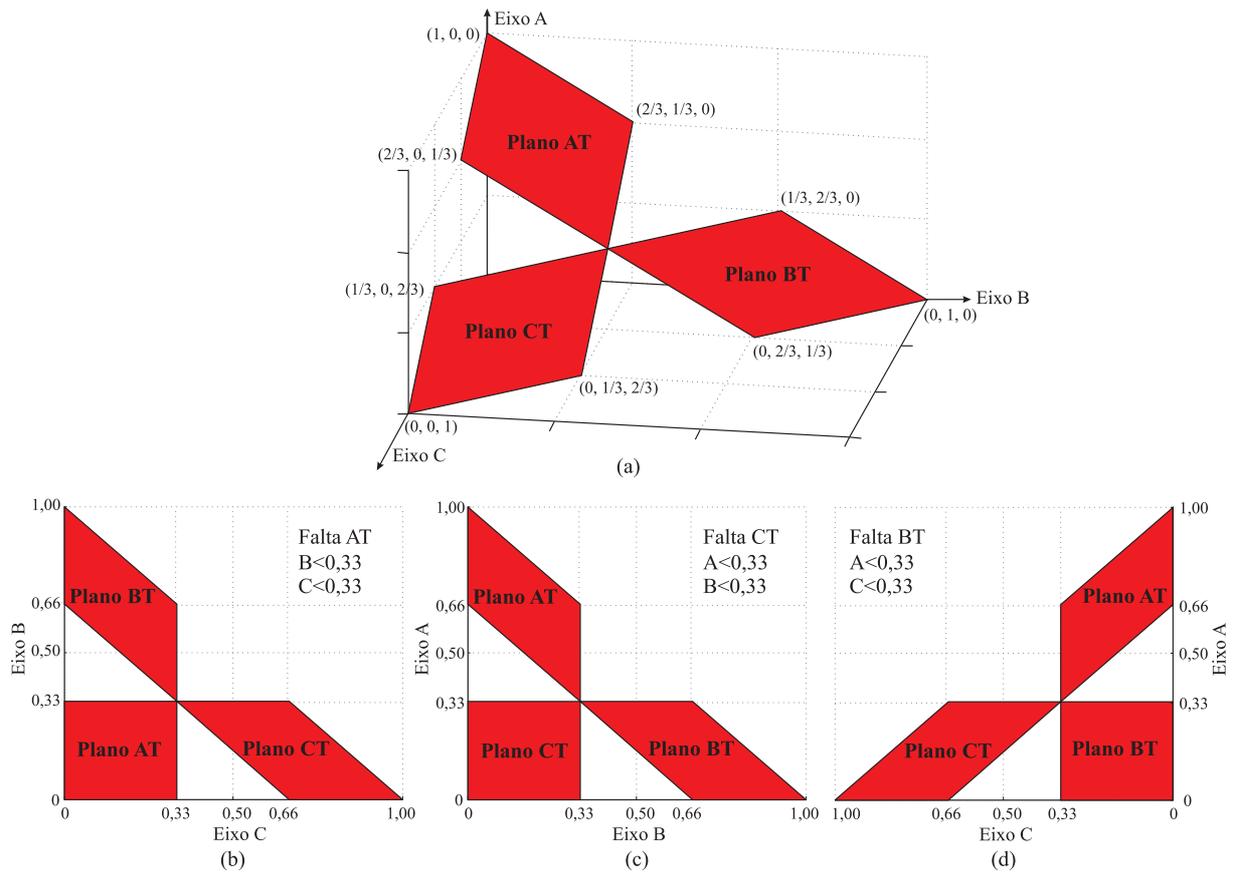


Figura 5.25. Planos correspondentes às faltas monofásicas.

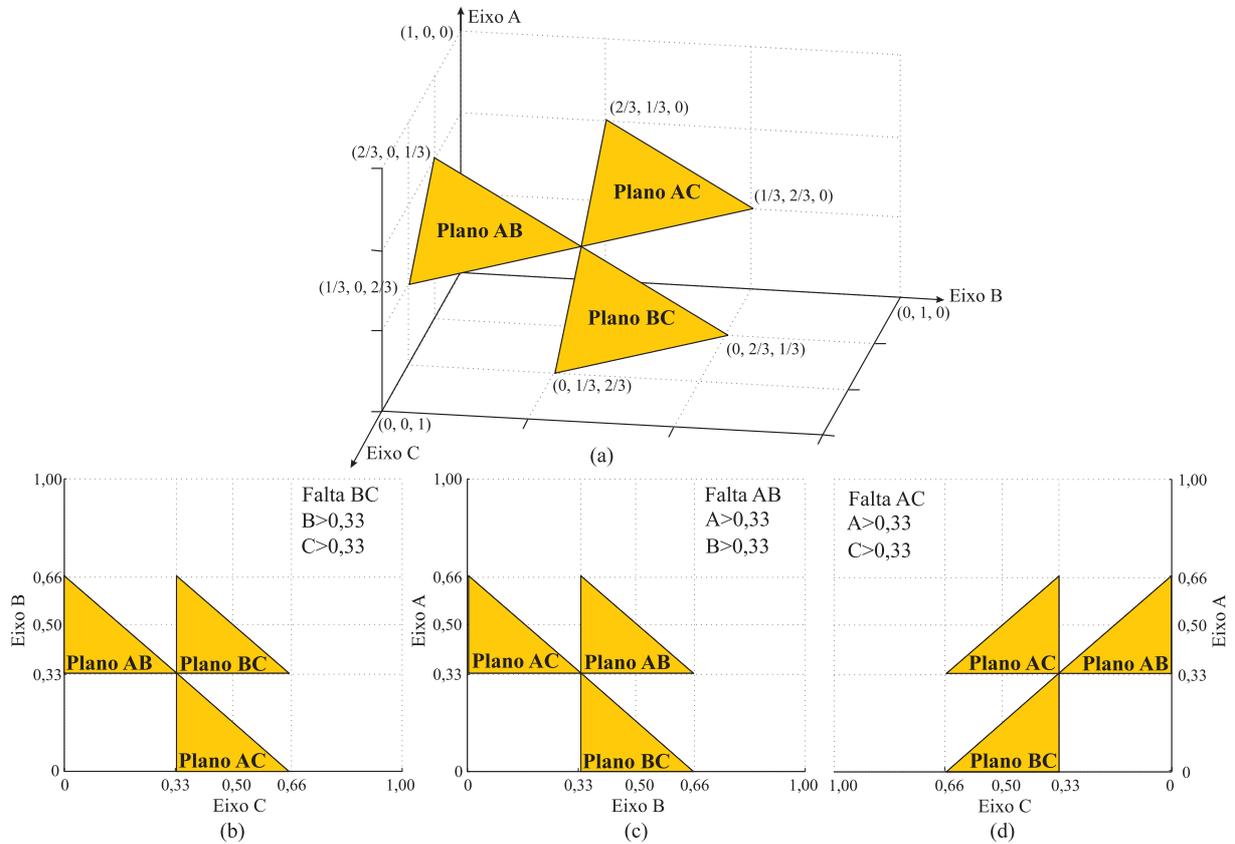


Figura 5.26. Planos correspondentes às faltas bifásicas.

Na Figura 5.27 são ilustradas as regiões geométricas no espaço ABC, correspondentes às diversas faltas monofásicas e bifásicas (planos de faltas). Observou-se que os planos referentes às faltas monofásicas podem ser divididos ao meio, de modo que cada região do triângulo de faltas corresponde a um triângulo isósceles, com aresta $X = \sqrt{2}/3$.

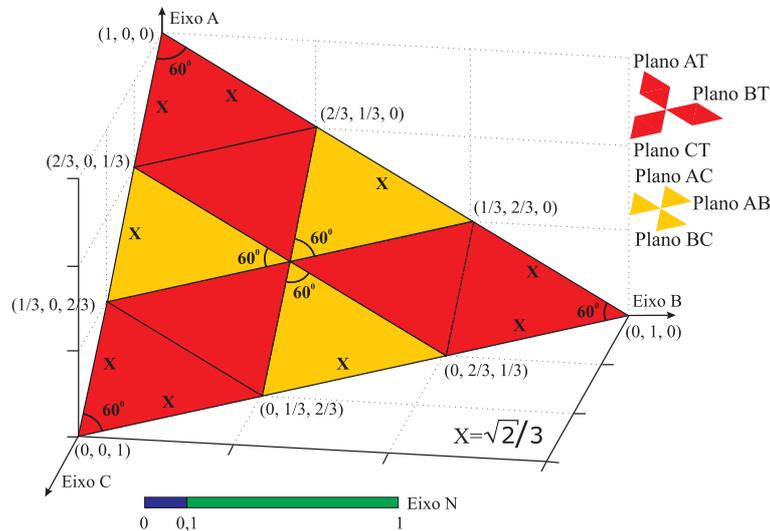


Figura 5.27. Regiões geométricas referentes às faltas monofásicas e bifásicas.

A posição geométrica correspondente às coordenadas A , B e C é utilizada para identificação da participação das fases em uma falta, enquanto que a identificação da participação da terra na falta é verificada a partir da análise dos valores de energia dos coeficientes *wavelet* da corrente de neutro. O valor da coordenada N , portanto, indica a participação da terra na falta, sendo representada por uma quarta dimensão (cor). As coordenadas de cor verde indicam $N \geq 0,1$ e de cor azul indicam $N < 0,1$.

Conforme exposto na Seção 5.2, para valores constantes de r_f e d_f , as energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N} variam com θ_f , apresentando o mesmo valor de δ_E em uma respectiva falta monofásica ou bifásica. Como consequência, nas faltas monofásicas e bifásicas, as coordenadas $A(\theta_f)$, $B(\theta_f)$, $C(\theta_f)$ e $N(\theta_f)$ devem se localizar aproximadamente em um único ponto nos respectivos planos de falta, enquanto que nas faltas bifásicas para a terra e trifásicas, as coordenadas $A(\theta_f)$, $B(\theta_f)$, $C(\theta_f)$ e $N(\theta_f)$ podem mudar de posição nos respectivos planos de falta.

Na Figura 5.28 são ilustradas as coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas em função de θ_f , simuladas na Seção 5.2 e calculadas com as energias da amostra em meio ciclo após o instante inicial dos transitórios no local de falta ($k_1 + \Delta k/2$) e na barra 1 ($k_f + \Delta k/2$). Independente do

ângulo de incidência da falta, todas as coordenadas de uma falta específica se localizaram em torno de um único ponto, nos respectivos planos de falta.

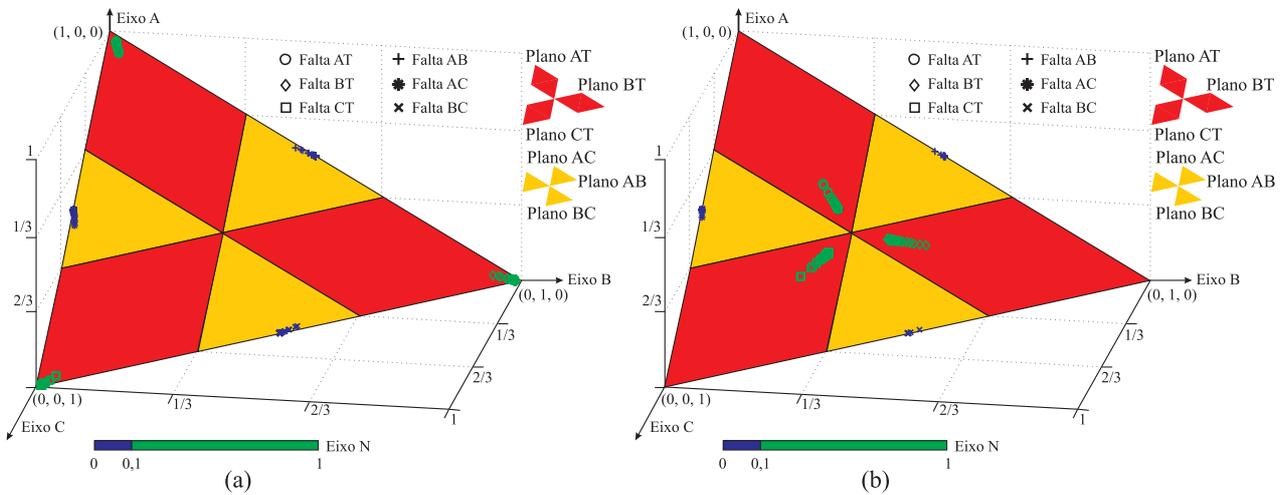


Figura 5.28. Posição geométrica das coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas em função do ângulo de incidência de falta: (a) no local de falta; (b) na barra 1.

As coordenadas das faltas monofásicas localizam-se nos respectivos planos AT, BT ou CT. Porém, as coordenadas tendem a se posicionarem na respectiva bissetriz interna do triângulo de faltas, entre o vértice e o incentro. No geral, o valor de N é maior que 1. Por conseguinte, as coordenadas das faltas monofásicas apresentam cor verde. Com relação às faltas bifásicas, como as energias dos coeficientes *wavelet* da corrente da fase $sã$ e de neutro são aproximadamente nulas, as coordenadas das faltas localizam-se no ponto médio do lado oposto dos vértices do triângulo de faltas, nos respectivos planos de faltas e com a cor azul.

Além do efeito do ângulo de incidência, o efeito da distância de falta nas coordenadas A , B e C pode ser verificado na Figura 5.28. À medida que as faltas se aproximam do ponto de monitoramento, as coordenadas das faltas monofásicas tendem aos vértices do triângulo de faltas, enquanto que à medida em que as faltas se distanciam do local de monitoramento, as coordenadas tendem ao centro do triângulo. Constatou-se que a posição das coordenadas das faltas bifásicas são independentes da localização da falta.

Na Figura 5.29 são ilustradas as coordenadas das faltas bifásicas para terra simuladas na Seção 5.2, calculadas com as energias da amostra $k_1 + \Delta k / 2$ (meio ciclo após o instante inicial dos transitórios de falta na barra 1). Apenas as coordenadas relacionadas às faltas com $\theta_f = \{0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 180^\circ\}$ são apresentadas na Figura 5.29. Conforme discutido na Seção 5.2,

os transitórios das faltas bifásicas para a terra nas fases envolvidas com a falta se comportam de forma semelhante aos transitórios das faltas bifásicas. Independente do ângulo de incidência das faltas, todas as coordenadas localizaram-se nos respectivos planos de faltas bifásicas. Porém, diferentemente das coordenadas das faltas bifásicas, as coordenadas das faltas bifásicas para a terra se posicionam em torno de uma elipse com centro na respectiva bissetriz interna do triângulo de faltas, tangente ao lado do triângulo que intercepta essa bissetriz interna. Constatou-se que as energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} das faltas bifásicas para a terra variam senoidalmente com θ_f e apresentam diferentes defasamentos. Como consequência, as coordenadas A , B e C apresentam comportamento elíptico com a variação de θ_f , semelhante a uma figura de Lissajous em três dimensões.

Quando $\theta_f \rightarrow 60^\circ$, os transitórios das faltas bifásicas para terra tendem a apresentar comportamento similar aos transitórios de uma falta bifásica. Portanto, as coordenadas de falta tendem a se posicionar no lado oposto dos vértices do triângulo de faltas e com cor azul, indicado na Figura 5.29. Nestes casos, as faltas bifásicas para a terra podem ser facilmente diferenciadas das faltas bifásicas, pelo uso da energia dos coeficientes de aproximação da corrente de neutro (\ddot{E}_{i_N}), visto que i_N é aproximadamente zero em faltas bifásicas, como discutido mais adiante, na Seção 5.5.

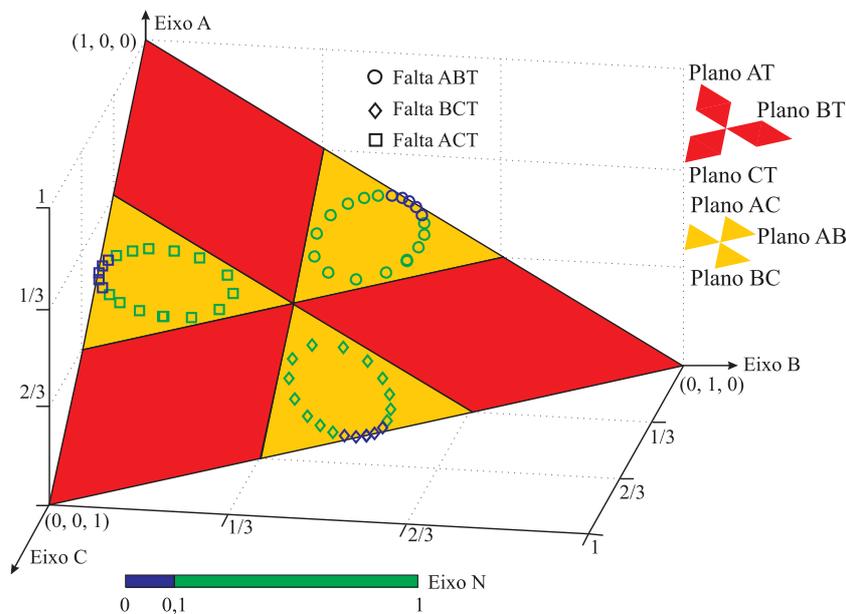


Figura 5.29. Posição geométrica das coordenadas das faltas bifásicas para a terra na barra 1 em função do ângulo de incidência de falta.

Na Figura 5.30(a) são ilustradas as coordenadas das faltas trifásicas simuladas na Seção 5.2, calculadas com as energias $\mathcal{E}_{i_{Af}}$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}$, $\mathcal{E}_{i_{Cf}}$ e $\mathcal{E}_{i_{Nf}}$, em função de θ_f , no local das faltas, na amostra $k_f + \Delta k/2$ (meio ciclo após o instante inicial das faltas). Como as energias $\mathcal{E}_{i_{Af}}$, $\mathcal{E}_{i_{Bf}}$ e $\mathcal{E}_{i_{Cf}}$ variam senoidalmente com θ_f , com o mesmo valor máximo e mesma defasagem entre si, as coordenadas A , B e C pertencem a uma trajetória circular (figura de Lissajous), circunscrita ao triângulo de faltas.

Conforme ilustrado na Figura 5.30(a), todas as coordenadas apresentam cor azul. Para $\theta_f \approx \{0^\circ, 60^\circ \text{ e } 120^\circ\}$, os transitórios de falta apresentam comportamento similar aos transitórios das faltas BC, AB e AC, respectivamente. Portanto, as coordenadas de falta localizam-se no lado oposto aos vértices do triângulo de faltas. Entretanto, dependendo do valor de θ_f , as coordenadas de falta localizam-se nos planos das faltas monofásicas. As faltas monofásicas e trifásicas são facilmente identificadas pela componente N , sendo $N < 0,1$ em faltas trifásicas e $N \geq 0,1$ em faltas monofásicas.

Na Figura 5.30(b) são ilustradas as coordenadas das faltas trifásicas relacionadas às energias \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N} , na barra 1, calculadas na amostra $k_1 + \Delta k/2$ (meio ciclo após a ocorrência dos transitórios de falta). As coordenadas de falta da Figura 5.30(b) apresentam o mesmo comportamento da Figura 5.30(a). Porém, com a distância da falta, as coordenadas são deslocadas em um ângulo β , que corresponde ao ângulo relacionado ao tempo de trânsito das ondas viajante do local de falta até o local de monitoramento (barra 1).

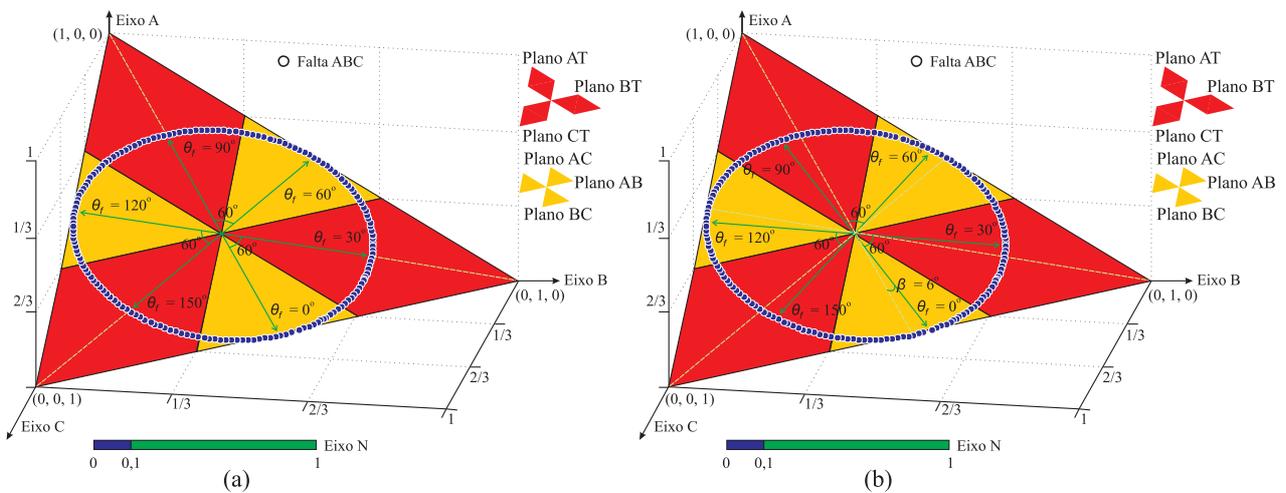


Figura 5.30. Posição geométrica das coordenadas das faltas trifásicas em função do ângulo de incidência de falta: (a) no local de falta; (b) na barra 1.

Na Figura 5.31 são ilustradas as coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas em função de r_f , simuladas na Seção 5.3, calculadas com as energias da amostra em meio ciclo após o instante inicial dos transitórios no local de falta ($k_1 + \Delta k/2$) e na barra 1 ($k_f + \Delta k/2$). Todas as coordenadas de uma falta específica se localizaram em um único ponto, nos respectivos planos de falta, o que demonstra que a posição das coordenadas de falta e, por conseguinte, a classificação das faltas independe da resistência de falta.

Além do efeito da resistência de falta, o efeito da distância de falta nas coordenadas A , B e C pode ser verificado na Figura 5.31. À medida que as faltas se aproximam do ponto de monitoramento, as coordenadas das faltas monofásicas tendem ao vértice do triângulo de faltas, enquanto que à medida em que as faltas se distanciam do local de monitoramento, as coordenadas tendem ao centro do triângulo. A posição das coordenadas das faltas bifásicas são independentes da localização da falta.

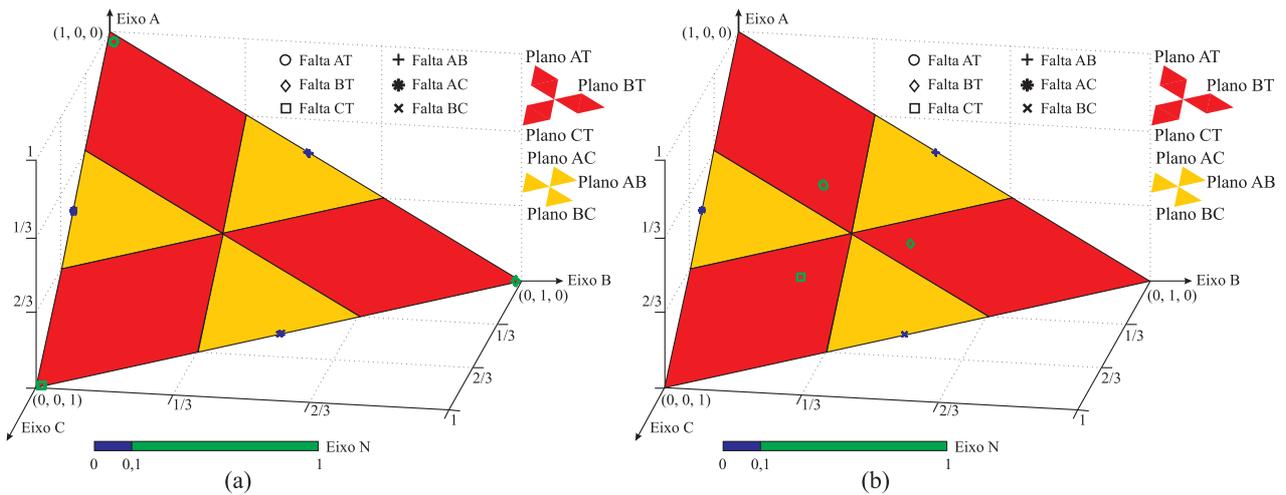


Figura 5.31. Posição geométrica das coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas em função da resistência de falta: (a) no local de falta; (b) na barra 1.

5.5 ENERGIA DOS COEFICIENTES DE APROXIMAÇÃO

Na Figura 5.32 são ilustradas as tensões e correntes de faltas AB, ABT e ABC, com $\theta_f = 60^\circ$. Nesses casos, verificou-se a existência de transitórios apenas nos sinais das fases A e B. Ao avaliar a influência do ângulo de incidência nos transitórios de falta, para $\theta_f = 60^\circ$, têm-se $\mathcal{E}_{v_A} \approx \mathcal{E}_{v_B}$, $\mathcal{E}_{v_C} \approx \mathcal{E}_{v_N} \approx 0$, $\mathcal{E}_{i_A} \approx \mathcal{E}_{i_B}$ e $\mathcal{E}_{i_C} \approx \mathcal{E}_{i_N} \approx 0$ nas faltas bifásicas, bifásicas para terra e trifásicas. Como consequência, as coordenadas de falta nestes três casos tendem a se localizar no lado oposto ao vértice do triângulo de faltas que intercepta o eixo C, com a cor azul (Figuras 5.28, 5.29 e 5.30).

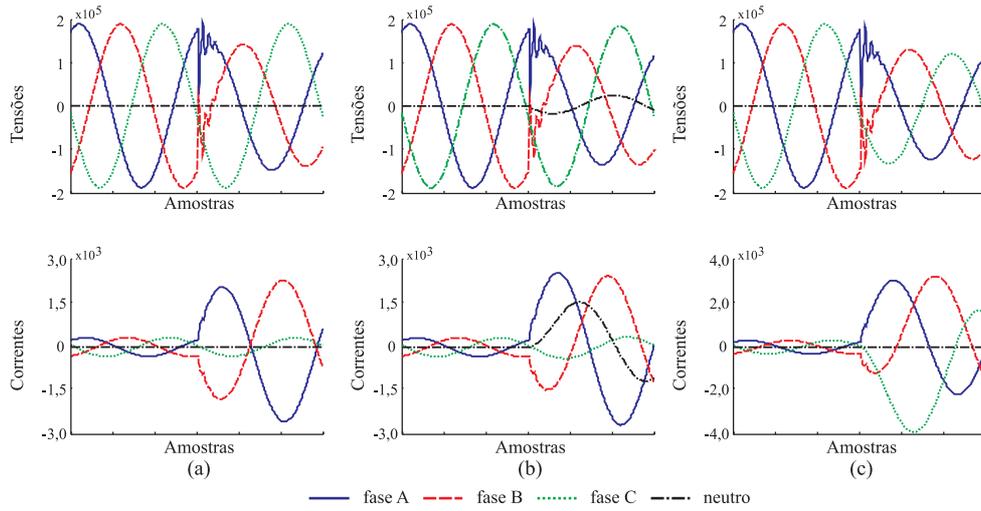


Figura 5.32. Efeito do ângulo de incidência de falta nas tensões e correntes, para $\theta_f=60^\circ$: (a) falta AB; (b) falta ABT; (c) falta ABC.

Quando as coordenadas de falta possuem cor azul e se localizam nos planos AB, BC ou AC, o método baseado nas coordenadas A , B , C e N classifica as faltas apenas como bifásicas, não distinguindo entre faltas bifásicas, bifásicas para terra e trifásicas. Esse problema foi contornado adicionando ao método informações relativas às energias dos coeficientes de aproximação das correntes ($\ddot{\mathcal{E}}_{i_A}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{i_B}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{i_C}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{i_N}$). Observou-se um aumento gradativo no valor de $\ddot{\mathcal{E}}_{i_N}$ em uma falta bifásica para a terra e de $\ddot{\mathcal{E}}_{i_A}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{i_B}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{i_C}$ em uma falta trifásica.

O aumento no valor de $\ddot{\mathcal{E}}_{i_A}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{i_B}$, $\ddot{\mathcal{E}}_{i_C}$ e $\ddot{\mathcal{E}}_{i_N}$ é verificado para correção da classificação da falta, no caso de uma falta bifásica para terra, quando

$$\ddot{\mathcal{E}}_{i_N} \geq 0, 2 \frac{\ddot{E}_{i_A} + \ddot{E}_{i_B} + \ddot{E}_{i_C}}{3}, \quad (5.18)$$

ou no caso de uma falta trifásica, quando:

$$\ddot{\mathcal{E}}_{i_A} \geq 1, 2 \ddot{E}_{i_A}, \quad (5.19)$$

$$\ddot{\mathcal{E}}_{i_B} \geq 1, 2 \ddot{E}_{i_B}, \quad (5.20)$$

e

$$\ddot{\mathcal{E}}_{i_C} \geq 1, 2 \ddot{E}_{i_C}, \quad (5.21)$$

sendo \ddot{E}_{i_A} , \ddot{E}_{i_B} e \ddot{E}_{i_C} os valores médios das energias dos coeficientes de aproximação das correntes de fase, em um ciclo pré-falta.

5.6 MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

De acordo com a Figura 4.50, o método de classificação de faltas é executado durante um período de meio ciclo após a detecção de um PT, quando $E_{PTV}=1$ ou $E_{PTI}=1$. Nesse período, a classificação da falta é realizada, amostra por amostra, com base na análise da posição geométrica das coordenadas A , B , C no triângulo de faltas e no valor da coordenada N , cujo procedimento é ilustrado na Figura 5.33. Além das variáveis binárias E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} , E_{pos} e E_{sag} usadas na detecção em tempo real dos distúrbios transitórios, o método de diagnóstico utiliza as variáveis binárias E_A , E_B , E_C e E_N para informar a classificação, em tempo real, de faltas nos canais digitais dos registros oscilográficos do RDP. Os valores de E_A , E_B , E_C e E_N mudam dinamicamente, conforme o tipo de falta no período avaliado (Figura 5.33).

De acordo com a Figura 5.33, em uma determinada amostra k , tem-se:

1. Uma falta é monofásica quando duas das coordenadas A , B e C apresentam valor inferior a $1/3$ (localizadas nos planos AT, BT ou CT) e com valor de N maior que $0,1$ (cor verde).
2. Uma falta é bifásica para terra quando duas das coordenadas A , B e C apresentam valor superior a $1/3$ (localizadas nos planos AB, BC ou AC) e com valor de N maior que $0,1$ (cor verde).
3. Uma falta é trifásica quando duas das coordenadas A , B e C apresentam valor inferior a $1/3$ (localizadas nos planos AT, BT ou CT) e com valor de N menor que $0,1$ (cor azul).
4. Uma falta é bifásica quando duas das coordenadas A , B e C apresentam valor superior a $1/3$ (localizadas nos planos AB, BC ou AC), com valor de N menor que $0,1$ (cor azul).
5. Uma falta bifásica é modificada para falta bifásica para terra quando a Inequação 5.18 é verificada.
6. Uma falta bifásica é modificada para falta trifásica quando todas as Inequações 5.19, 5.20 e 5.21 são verificadas.

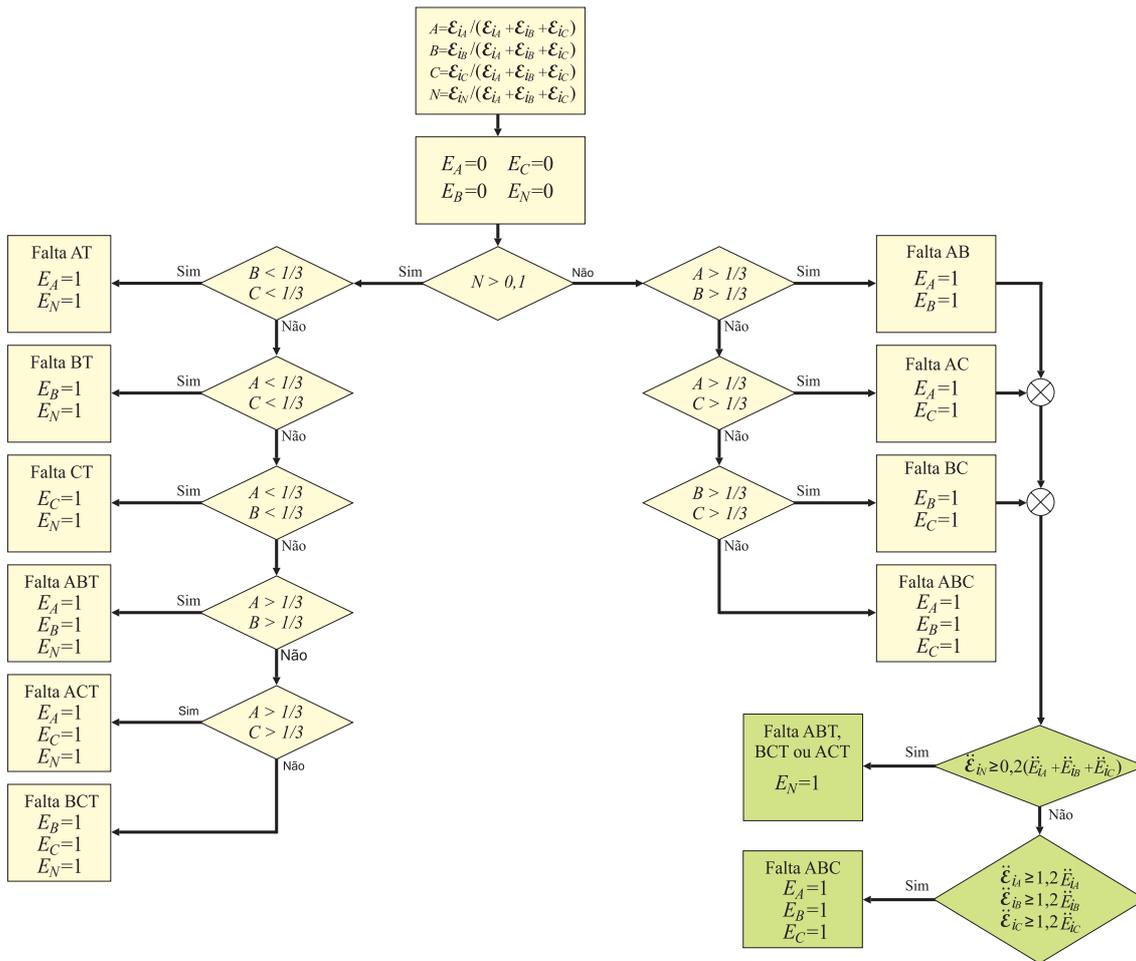


Figura 5.33. Diagrama de blocos do método de classificação parcial de faltas.

Na Figura 5.34 são ilustradas as coordenadas da falta CT da Figura 5.23, calculadas entre as amostras k_{2E} e $k_{2E} + \Delta k / 2$ (em meio ciclo após a incidência dos transitórios de falta). Todas as coordenadas de falta estão localizadas no plano referente às faltas CT, com $N > 1$, ou seja, $E_A = 0$, $E_B = 0$, $E_C = 1$ e $E_N = 1$ (falta CT). Na Figura 5.35 são ilustradas as curvas de energia da falta (Figura 4.11), incluindo os canais digitais referentes à classificação de faltas.

De acordo com a Figura 5.35, na primeira amostra em que os transitórios de falta foram detectados (k_{2E}), o método classificou corretamente a falta como CT ($E_A = 0$, $E_B = 0$, $E_C = 1$ e $E_N = 1$). A mesma classificação foi mantida durante meio ciclo de análise.

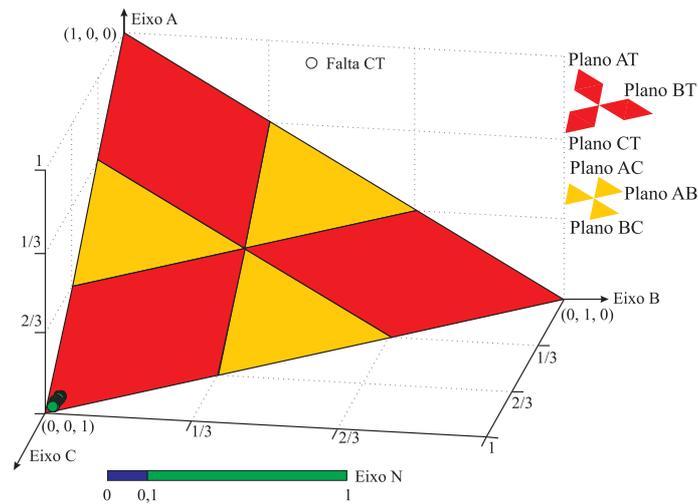


Figura 5.34. Coordenadas da falta CT referentes ao PT2.

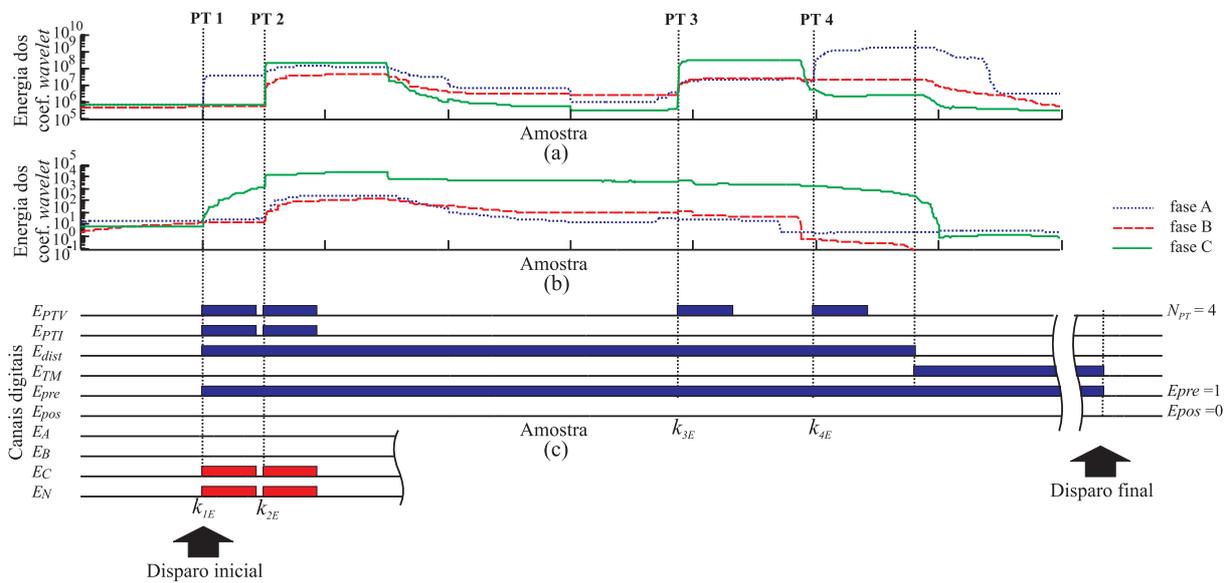


Figura 5.35. Curvas de energia de um registro oscilográfico real com falta CT: (a) tensões; (b) correntes; (c) canais digitais.

No caso particular de uma falta evolutiva, quando o método de detecção de distúrbios identifica um PT entre os instantes inicial e final de uma falta (Figuras 4.13 e 4.14), o algoritmo de classificação em tempo real (Figura 5.33) também é executado, amostra por amostra, em meio ciclo após a detecção dos transitórios referentes à segunda etapa da falta. O resultado da classificação da segunda etapa da falta vai sendo então, armazenado em tempo real, nas variáveis E_A , E_B , E_C e E_N . Porém, a classificação real da falta só é feita considerando apenas a primeira parte da falta, que pode ser obtida pela operação lógica OU das variáveis binárias E_A , E_B , E_C e E_N da primeira parte da falta com as respectivas variáveis binárias E_A , E_B , E_C e E_N da segunda parte da falta em uma determinada amostra.

Considerando que a primeira etapa da falta foi diagnosticada como uma falta AT ($E_A=1$, $E_B=0$, $E_C=0$ e $E_N=1$), então a falta pode evoluir para uma falta ABT, ACT ou trifásica. Se as coordenadas da segunda etapa localizarem-se nos planos AC ($E_A=1$, $E_B=0$, $E_C=1$ e $E_N=0$) ou CT ($E_A=0$, $E_B=0$, $E_C=1$ e $E_N=1$), tem-se uma falta ACT, visto que o resultado da operação lógica OU resulta em $E_A=1$, $E_B=0$, $E_C=1$ e $E_N=1$. Caso as coordenadas localizem-se nos planos AB ou BT, tem-se uma falta ABT. Por fim, caso as coordenadas localizem-se no plano BC, tem-se uma falta trifásica (Figura 5.36).

Após classificação da segunda etapa da falta, pode-se ter ainda, uma terceira evolução da falta. Por exemplo, uma falta AT+ACT pode evoluir para uma falta trifásica. Neste caso, a falta trifásica é confirmada, caso as coordenadas de falta da terceira etapa localizem-se nos planos BC, AB ou BT (Figura 5.37).

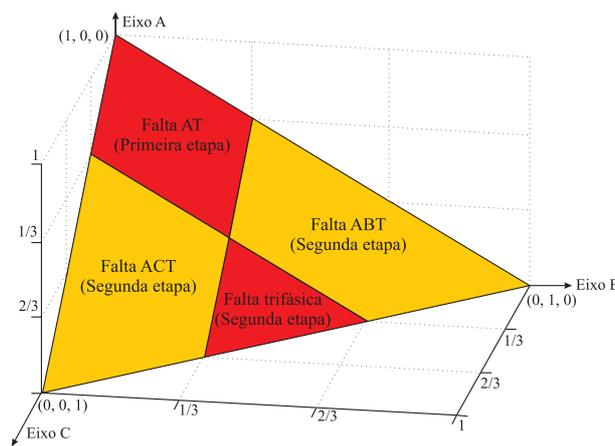


Figura 5.36. Posição geométrica das coordenadas de uma falta AT que evolui para uma falta bifásica terra ou trifásica.

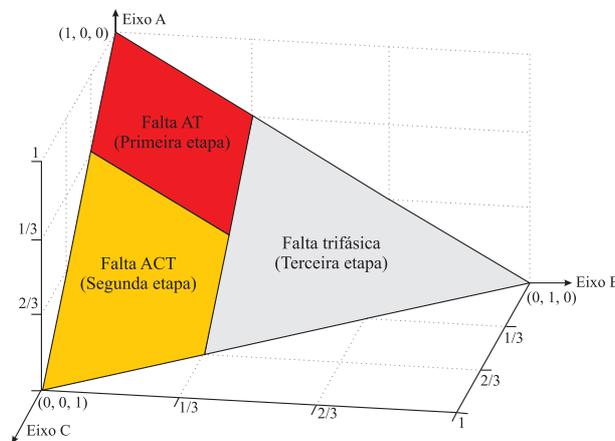


Figura 5.37. Posição geométrica das coordenadas da terceira etapa de uma falta evolutiva AT+ACT+ABCT.

5.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi feito um estudo para avaliar a variação da energia dos coeficientes *wavelet* relacionada aos transitórios de falta, para todos os tipos de falta, em função do ângulo de incidência de falta, no qual foi visto que as energias normalizadas relacionadas às correntes podem ser usadas para classificação em tempo real de falta. A influência da resistência de falta, da distância de falta, da *wavelet* mãe e da escala *wavelet* nas energias dos coeficientes *wavelet* também foram avaliadas, embora com menos profundidade.

Ao final, um método de classificação de faltas e de faltas evolutivas baseado na análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet* foi proposto.

IMPLEMENTAÇÕES EM TEMPO REAL

O RTDSTM é uma ferramenta de simulação digital, com capacidade de modelar sistemas elétricos de potência de forma realista e em tempo real (KUFFEL *et al.*, 1995). Além disso, o RTDSTM permite ao usuário implementar e incorporar seus próprios modelos e algoritmos às simulações digitais em tempo real, viabilizando o desenvolvimento de modelos de componentes do sistema elétrico, assim como o desenvolvimento de algoritmos para dispositivos de controle e proteção (GIESBRECHT *et al.*, 1998; OUELLETTE *et al.*, 2004; OUELLETTE *et al.*, 2006), além de algoritmos de diagnósticos em tempo real para dispositivos de monitoramento, como proposto nesta tese.

Usando o RTDSTM, implementou-se um RDP com módulo de captura dos registros oscilográficos baseado na análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes. Os detalhes dessa implementação são apresentados neste capítulo. No Apêndice A, entretanto, é feita uma descrição sucinta dos principais componentes de um RDP comercial.

Os detalhes de implementação dos sistemas elétricos usados para avaliar o desempenho do RDP proposto também são apresentados neste capítulo.

6.1 MODELAGEM DO RDP

O RDP proposto é constituído por dois tipos de entradas (Figura 6.1):

- Entradas analógicas para monitoramento das tensões e correntes de fase (v_A , v_B , v_C , i_A , i_B e i_C), que dão origem aos canais analógicos dos registros oscilográficos, na ocorrência dos distúrbios transitórios.
- Entradas digitais para monitoramento do estado lógico dos contatos dos disjuntores e da sequência de atuação dos relés de proteção, que dão origem aos canais digitais, denominados canais digitais usuais.

Conforme apresentado nos Capítulos 4 e 5, os distúrbios transitórios, tais como faltas, são detectados automaticamente pelo RDP proposto, por meio da análise em tempo real das energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes, que formam os canais analógicos do dispositivo. Na ocorrência desses eventos, variáveis binárias internas ao RDP (E_{PTV} , E_{PTI} , E_{dist} , E_{TM} , E_{pre} , E_{pos} , E_{sag} , E_A , E_B , E_C e E_N) mudam de valores, em tempo real, conforme o tipo de distúrbio. Essas variáveis também são armazenadas nos canais digitais dos registros (canais digitais de diagnóstico). Desta forma, além da função precípua de armazenar dados oscilográficos concernentes a um distúrbio transitório, o RDP proposto identifica e indica o tipo de ocorrência monitorada. Além disso, os registros oscilográficos gerados são padronizados no formato COMTRADE (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1991).

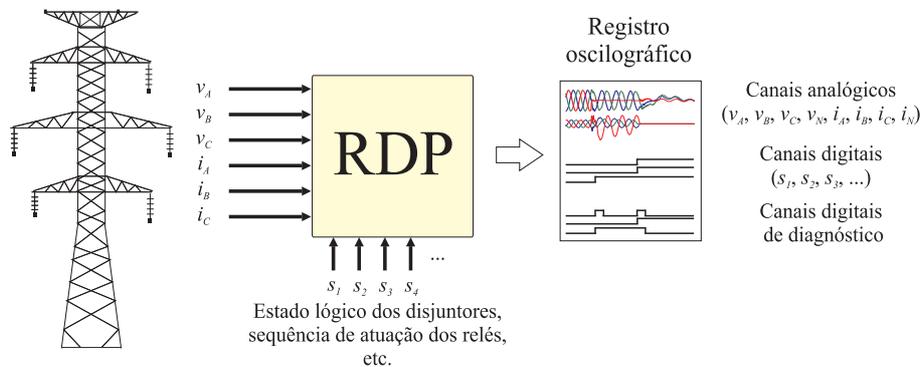


Figura 6.1. Entradas e saídas do RDP proposto.

Nas simulações em tempo real, os canais digitais usuais contêm informações sobre o estado lógico das chaves de simulação das faltas e do estado lógico dos contatos dos disjuntores. Com isso, o tipo da falta e os instantes inicial e final das ocorrências podem ser identificados posteriormente e comparados com o diagnóstico obtido pelo método proposto, em uma análise manual dos canais digitais dos registros oscilográficos. As entradas digitais que dão origem aos canais digitais usuais não são utilizadas no disparo do RDP proposto, apenas as variáveis lógicas que dão origem aos canais digitais de diagnóstico desempenham esta função.

Na Figura 6.2 é ilustrado o diagrama de blocos simplificado do RDP proposto. As saídas dos TPCs e TCs constituem as entradas analógicas (tensões e correntes) do dispositivo, que são filtradas por filtros analógicos passa-baixas *anti-aliasing* com frequência de corte menor ou igual a frequência de Nyquist ($f_s/2$). Em seguida, as tensões e correntes são amostradas a uma frequência de amostragem f_s , pelo bloco Conversor Analógico Digital (A/D).

As tensões e correntes são avaliadas, em tempo real, pelo bloco Análise Automática de Distúrbios, no qual as variáveis binárias de diagnóstico vão sendo modificadas dinamicamente conforme a ocorrência dos eventos.

As entradas analógicas e digitais, assim como as variáveis binárias de diagnóstico, são armazenadas continuamente em um *buffer* (fila) com capacidade de armazenamento de 2 segundos de dados. Na ocorrência e eliminação dos distúrbios, o bloco Análise Automática de Distúrbios gera sinais de gatilho para o bloco Controle de Disparo, que por sua vez identifica as amostras no *buffer* e gera os registros oscilográficos no padrão COMTRADE, cujo tamanho é proporcional à duração do distúrbio.

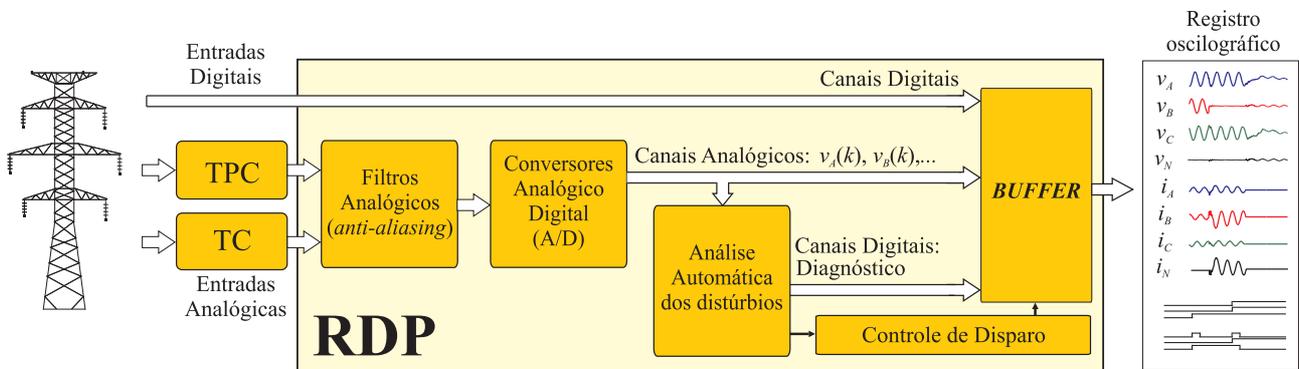


Figura 6.2. Arquitetura do RDP proposto.

Todos os componentes do sistema elétrico e do RDP, ilustrados na Figura 6.2, foram implementados e simulados no $RTDS^{TM}$, que é uma combinação de *hardware* e *software* constituído para alcançar o tempo real nas simulações do sistema elétrico. Para isso, foram utilizados os diversos módulos de *hardware* e *software* do simulador, cuja descrição sucinta é apresentada no Apêndice B.

O sistema elétrico e os blocos: Filtros Analógicos, Conversores Analógicos Digitais e Análise Automática dos Distúrbios foram modelados no módulo *draft* (Figura 6.3), enquanto que os blocos Controle de Disparo e o *Buffer* funcionam no módulo *runtime* do $RTDS^{TM}$ (Apêndice B).

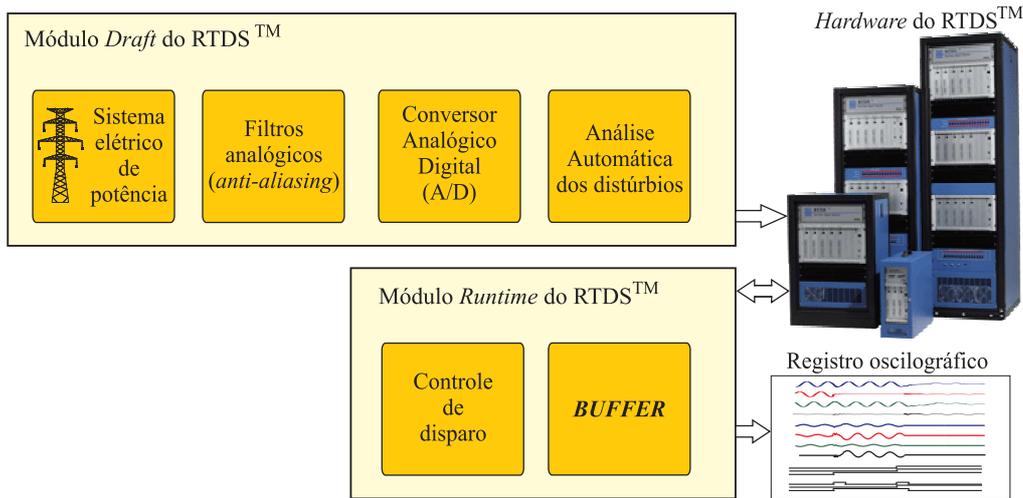


Figura 6.3. Diagrama de blocos do RDP proposto no RTDSTM.

6.1.1 O RDP no Módulo *Draft*

Na Figura 6.4 é ilustrada a modelagem dos componentes do RDP no módulo *draft*, no qual são executadas as seguintes operações:

- As tensões e correntes provenientes dos TPCs e TCs, respectivamente, são disponibilizadas impreterivelmente a cada $50 \mu\text{s}$ (20000 amostras/s) e passam por filtros passa-baixas, seguidas por um amostrador¹. Entretanto, ao se usar a taxa de amostragem de 20000 amostras/s, esses componentes não são necessários e as tensões e correntes podem alimentar diretamente o módulo de análise automática dos distúrbios.
- No bloco Análise Automática dos Distúrbios, as tensões e correntes passam por um bloco TWDR, no qual são calculados, em tempo real, os respectivos coeficientes *wavelet* e de aproximação. Em seguida, são calculadas, também em tempo real, as energias dos coeficientes *wavelet* e de aproximação das tensões e correntes. Por fim, as energias são avaliadas pelo método de diagnóstico de distúrbios transitórios (Figura 4.50), no qual as variáveis de diagnóstico vão sendo modificadas, em tempo real, com a ocorrência dos distúrbios.

¹No RTDSTM, o bloco Conversor Analógico Digital é substituído pelo bloco Amostrador, que realiza a função de subamostragem ou sobreamostragem, visto que as tensões e correntes provenientes do sistema já são amostradas a uma taxa de 20000 amostras/s

Os blocos TWDR, Energia e Diagnóstico de Distúrbios da Figura 6.4 foram implementados no módulo *CBuilder* do RTDSTM (Apêndice B), de acordo com o exposto nos Capítulos 3, 4 e 5. O bloco TWDR pode ser editado, no qual é possível escolher a TWD ou a TWDR, com uma determinada *wavelet* mãe: db4, db6, etc.

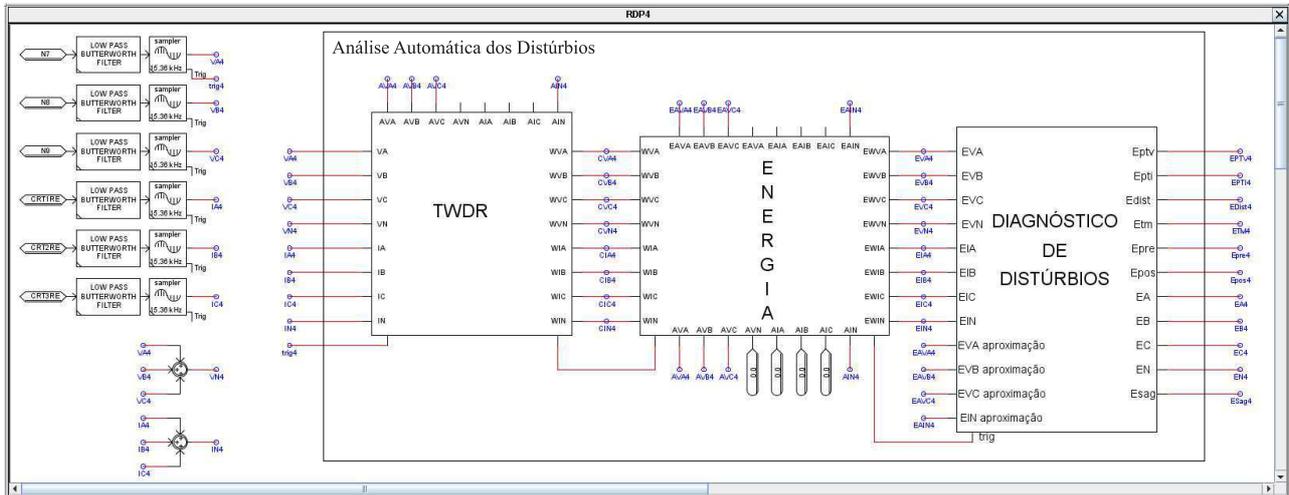


Figura 6.4. Modelagem dos componentes do RDP no módulo *draft*.

6.1.2 O RDP no Módulo *Runtime*

Obtido o sucesso da compilação do modelo do sistema elétrico em conjunto com o RDP, no módulo *draft*, pode-se inicializar a simulação em tempo real, por meio do módulo *runtime* (Apêndice B).

No módulo *runtime*, as tensões, as correntes e os sinais digitais que deverão ser armazenados nos canais analógicos e digitais do RDP devem ser apresentados em um gráfico, como ilustrado na Figura 6.5. Essas grandezas, no entanto, devem ter sido definidas no *draft* (entradas e saídas do bloco Análise Automática dos Distúrbios da Figura 6.4).

Além do gráfico com as grandezas elétricas a serem armazenadas nos registros oscilográficos pelo RDP, alguns componentes de controle para definição dos parâmetros de falta a ser simulada na linha de transmissão do sistema ao qual o RDP foi instalado, no módulo *draft*, também estarão disponíveis no *runtime*.

Quando é dado início à simulação em tempo real, as informações do sistema elétrico e do RDP do módulo *draft* são transferidos ao *hardware* do RTDSTM. O sistema elétrico deve funcionar em regime permanente até que a falta seja inicializada, por meio de um comando manual no *runtime* (botão FALTA). Na Figura 6.5 a falta foi programada manualmente para ser uma falta AT, com resistência de 10 Ω , ângulo de incidência de 90° e distância de 50% (metade da LT). Quando a falta foi aplicada ao sistema e detectada pelo RDP, então o *runtime* fez a aquisição dos sinais assinalados no gráfico durante a falta. O gráfico foi então salvo em disco no formato do padrão COMTRADE. Este processo é representado pelo bloco Controle de Disparo, enquanto que o gráfico representa o bloco *Buffer* da Figura 6.3.

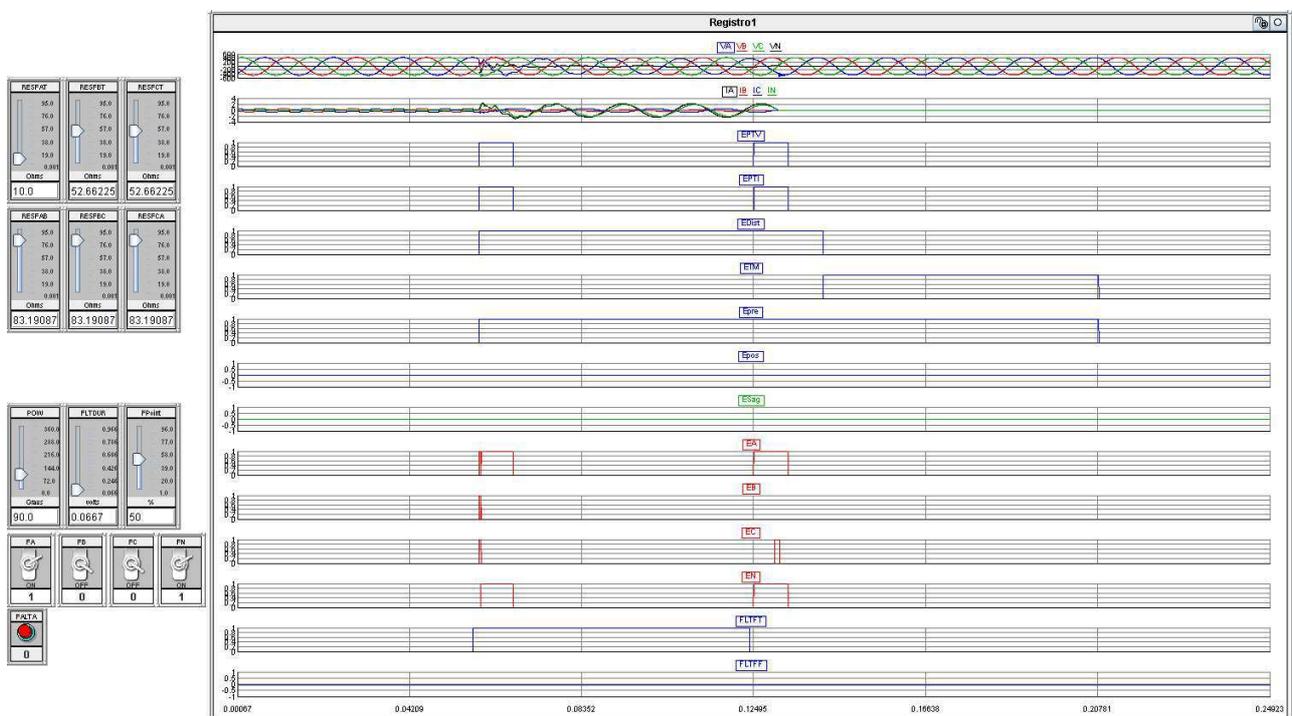


Figura 6.5. RDP no módulo *runtime*.

Todo o procedimento realizado no *runtime* pode ser feito via programação em linguagem C, na qual é possível, por exemplo, simular automaticamente centenas de faltas com parâmetros distintos em uma linha de transmissão e armazenar os registros oscilográficos do RDP em disco, para posterior análise do desempenho do método de diagnóstico das ocorrências.

6.2 MODELAGEM DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

De acordo com a Figura 6.3, o sistema elétrico também é modelado no módulo *draft*. Para avaliar o desempenho do RDP em simulações em tempo real, dois sistemas elétricos, um de 230 kV e outro de 500 KV, foram utilizados, e são descritos a seguir.

6.2.1 Sistema Elétrico de 230 kV

O modelo do sistema elétrico de 230 kV ilustrado na Figura 6.6 foi utilizado para avaliar o desempenho, em tempo real, do método de diagnóstico de distúrbios transitórios. O modelo desse sistema elétrico foi baseado no modelo proposto por (IEEE Power System Relaying Committee, 2004) para o teste de algoritmos de proteção, sendo composto por: uma fonte ideal S1; uma máquina síncrona S2 conectada na barra 3 por meio de um transformador Y- Δ , com Y aterrado; uma LT entre as barras 2 e 3 (LT3); uma LT de circuito duplo entre as barras 1 e 2 (LT1 e LT2). Todas as linhas são de 83 km e foram modeladas a parâmetros distribuídos.

No sistema elétrico foram adicionados quatro RDPs para monitoramento das linhas LT1 e LT2. Porém, o ponto de monitoramento desses dispositivos pode ser alterado, tornando possível a avaliação, em tempo real, do método de diagnóstico de distúrbios transitórios durante a ocorrência de faltas, afundamentos de tensão e manobras de energização e desligamento de LTs, de transformador de potência e de banco de capacitores. Os transformadores para instrumento também fazem parte do modelo.

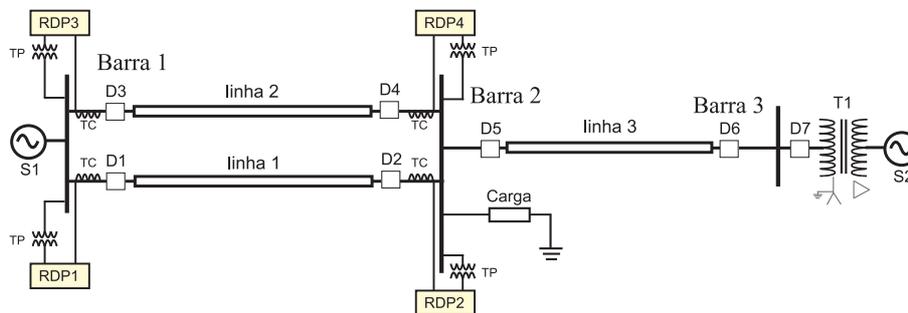


Figura 6.6. Modelo de um sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE.

6.2.2 Sistema Elétrico de 500 kV

O sistema elétrico simplificado da Figura 6.7 também foi modelado no RTDSTM, sendo composto por uma LT de 400 km de extensão, com reatores em derivação de 200 Mvar em cada extremidade e duas fontes com suas respectivas impedâncias. Os parâmetros do sistema foram baseados em dados reais obtidos do sistema elétrico de potência de 500 kV da Chesf (DANTAS *et al.*, 2009), apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2. A LT foi modelada a parâmetros distribuídos.

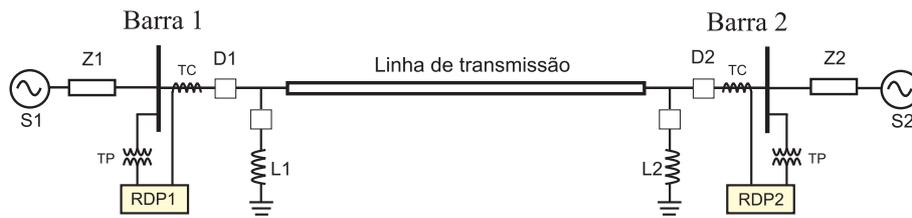


Figura 6.7. Modelo de um sistema elétrico de 500 kV.

Tabela 6.1. Dados das fontes do sistema de 500 kV.

Fonte	Módulo (kV)	Fase (°)	Sequência	$Z_S(\Omega)\angle\delta_S(^{\circ}) = r_S(\Omega) + jx_S(\Omega)$
S_1	500,0	0	Positiva	$28,51\angle 89,90 = 0,9681 + j28,513$
			Zero	$20,87\angle 86,90 = 1,1268 + j20,838$
S_2	495,0	10	Positiva	$28,51\angle 89,90 = 0,9681 + j28,513$
			Zero	$20,87\angle 86,90 = 1,1268 + j20,838$

Tabela 6.2. Dados da linha de transmissão do sistema de 500 kV.

Sequência	$r_{LT} (\Omega/km)$	$x_{LT} (\Omega/km)$	$y_{cLT} (\mu\text{S}/km)$
Positiva	0,0333	0,3170	5,2033
Zero	0,3996	0,9921	3,0839

No sistema elétrico foram adicionados dois RDPs para monitoramento da linha de transmissão, tornando possível a avaliação, em tempo real, do método de diagnóstico de distúrbios transitórios durante a ocorrência de faltas e manobras de energização e desligamento da LT.

6.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o diagrama de blocos simplificado do RDP proposto e como cada componente do dispositivo de monitoramento foi implementado no RTDSTM. Detalhes da modelagem dos sistemas elétricos usados para avaliar o método de diagnóstico proposto também foram descritos neste capítulo.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os resultados da avaliação, em tempo real, do desempenho do método de diagnóstico de distúrbios transitórios proposto. Nas simulações em tempo real, realizadas no RTDSTM, foram utilizados dois sistemas elétricos, com diferentes níveis de tensão. Os RDPs com o método proposto foram avaliados na ocorrência de diversos distúrbios transitórios, tais como faltas, faltas evolutivas, afundamentos de tensão e transitórios devido à energização de linhas de transmissão, com diversas taxas de amostragem. Uma versão *off-line* do método de diagnóstico também foi avaliada com registros oscilográficos reais da Chesf.

A taxa de acerto da detecção e classificação de faltas é apresentada em tabelas, com as coordenadas de cada falta, relacionadas à classificação das faltas, ilustradas nos triângulos de falta. As coordenadas foram calculadas com as energias médias de \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} , \mathcal{E}_{i_C} e \mathcal{E}_{i_N} , levando em consideração apenas as amostras em meio ciclo após os transitórios de falta.

7.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EM SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL - SISTEMA ELÉTRICO DE 230 KV

7.1.1 Base de dados 1: faltas na linha de transmissão 1

O desempenho do método de diagnóstico de distúrbios proposto foi avaliado em quatro RDPs, com taxa de amostragem de 20000 amostras/s, que monitoravam as linhas LT1 e LT2 do sistema de 230 kV, descrito na Seção 6.2.1. Um total de 1000 faltas ao longo da LT1 (Figura 7.1) foram simuladas com parâmetros de valores aleatórios: $\theta_f \in \{0^\circ, 180^\circ\}$, $r_f \in \{0, 100\} \Omega$ e $d_f \in \{15, 68\}$ km da barra 1. Com relação ao tipo de falta, 67% das faltas foram monofásicas, 25% bifásicas, 3% bifásicas para terra e 5% trifásicas (IEE, 1995; TLEIS, 2008). Após 3 ciclos de duração, os disjuntores D1 e D2 abrem para eliminação da falta. Nestas condições, espera-se que os RDP1 e RDP2 detectem, em tempo real, faltas na LT1, enquanto que os RDP3 e RDP4 detectem afundamentos de tensão na LT2.

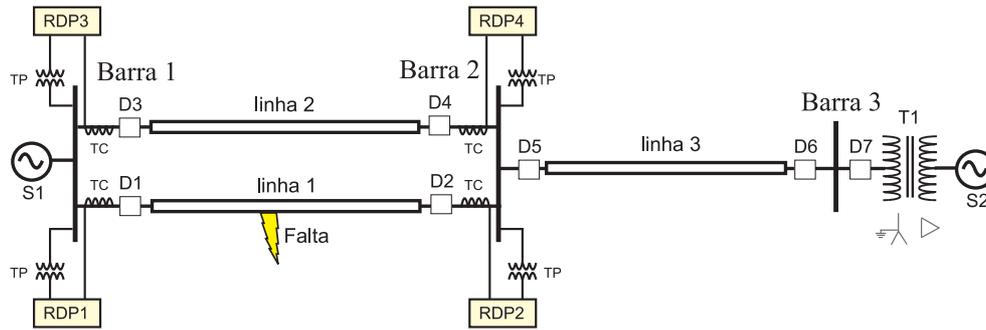


Figura 7.1. Falhas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE.

Na Figura 7.2 são ilustrados os registros oscilográficos gerados pelos RDP1, RDP2 e RDP3 durante a ocorrência de uma falta AT na LT1, com $\theta_f=26,8^\circ$, $r_f=12,8 \Omega$ e $d_f=27$ km da barra 1. Pela análise dos canais analógicos e digitais desses registros, observa-se que todos os RDPs detectaram, em tempo real, os instantes relacionados ao início e fim da ocorrência ($E_{PT}=\uparrow$). Os RDP1 e RDP2 classificaram o distúrbio como falta ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $k_n E - k_m E > 2\Delta k$). A falta foi classificada, em tempo real, como falta AT em todas as amostras durante um período de meio ciclo após a detecção do evento ($E_A=1$, $E_B=0$, $E_C=0$ e $E_N=1$ em meio ciclo após $E_{dist}=\uparrow$). O RDP3 classificou o distúrbio como afundamento de tensão ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$ em $E_{TM}=\downarrow$ e $E_{sag}=\uparrow$ em mais de meio ciclo durante $E_{dist}=1$).

Os resultados obtidos com o método proposto para as 1000 faltas simuladas são sumarizados na Tabela 7.1. Os quatro RDPs detectaram distúrbios transitórios em todas as simulações e registraram todas as ocorrências, apresentando uma taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios.

O RDP1 não detectou os transitórios referentes às faltas em 11 simulações, detectando apenas os transitórios na eliminação das faltas. Nestes casos, as faltas foram classificadas como desligamentos, visto que apenas um PT foi detectado. Portanto, o RDP1 apresentou uma taxa de acerto de 98,90% na classificação dos distúrbios (detecção de faltas). O RDP2 também classificou 11 ocorrências como desligamento, apresentando uma taxa de acerto de 98,90% na classificação dos distúrbios. Com relação aos RDP3 e RDP4, as ocorrências foram classificadas como afundamentos de tensão ou transitórios de chaveamento.

O instante inicial das faltas foi identificado com um erro médio de duas amostras ($100 \mu s$ para $f_s=20000$ amostras/s) nos RDP1 e RDP2. Com relação à classificação das faltas, os RDP1 e RDP2 apresentaram uma taxa de acerto de 99,90% e 100%, respectivamente.

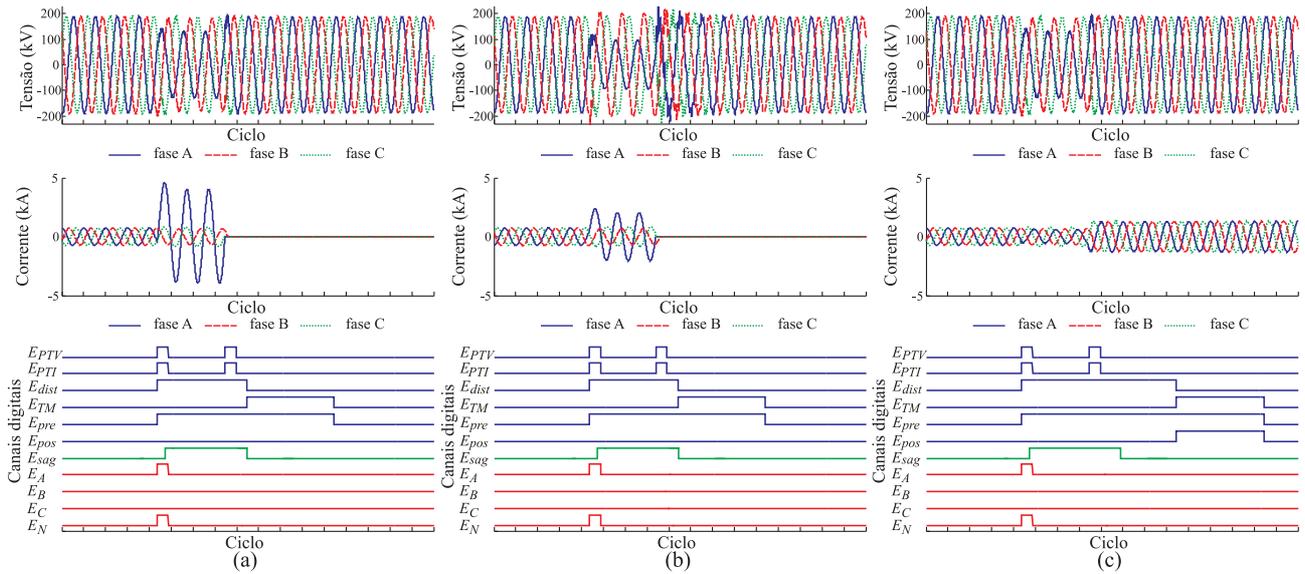


Figura 7.2. Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta AT: (a) RDP1; (b) RDP2; (c) RDP3.

Tabela 7.1. Resultados obtidos com a ocorrência de faltas na linha 1 do sistema elétrico de 230 kV.

RDP	Quantidade de simulações	Taxa de acerto na detecção de distúrbios	Taxa de acerto na classificação de distúrbios	Tempo médio de detecção do instante inicial das faltas	Taxa de acerto na classificação de faltas
RDP1	1000	100%	98,90%	100 μ s	99,90%
RDP2	1000	100%	98,90%	100 μ s	100,00%
RDP3	1000	100%	100,00%	-	-
RDP4	1000	100%	100,00%	-	-

O desempenho do método proposto no diagnóstico, por tipo de falta, obtido pelos RDP1 e RDP2 é sumarizado na Tabela 7.2. Com relação à taxa de acerto na etapa de detecção de faltas, 7 faltas monofásicas e 4 faltas bifásicas não foram detectadas pelo método proposto nos RDP1 e RDP2, enquanto que todas as faltas bifásicas para a terra e trifásicas foram detectadas com sucesso. Como visto no Capítulo 5, há um valor específico para o ângulo de incidência em faltas monofásicas e bifásicas em que os transitórios são bastante amortecidos, a exemplo de $\theta_f \rightarrow 0^\circ$ (180°) em faltas AT.

O método da sobrecorrente (Apêndice C) foi implementado e avaliado *off-line* com os registros oscilográficos com falta gerados pelo RDP proposto. O desempenho do método da sobrecorrente de falta para detecção e classificação de faltas também é apresentado na Tabela 7.2. De 670 faltas monofásicas, 92 faltas não foram detectadas pelo método da sobrecorrente no RDP1, enquanto que todas as faltas bifásicas, bifásicas para a terra e trifásicas foram detectadas com sucesso. No RDP2, 98 faltas monofásicas não foram detectadas. Conforme Adu (2002), Elkalashy *et al.* (2009), a causa principal da deficiência do método das sobrecorrentes é o fato da sobrecorrente de falta diminuir com o aumento da resistência de falta.

Tabela 7.2. Resultados da detecção e classificação de faltas na linha 1 do sistema elétrico de 230 kV.

RDP	Tipo de falta	Taxa de acerto na detecção de faltas		Taxa de acerto na classificação de faltas	
		Método proposto	Método da sobrecorrente	Método proposto	Método da sobrecorrente
RDP1	AT	98,66%	85,71%	100,00%	98,65%
	BT	98,65%	86,10%	100,00%	99,32%
	CT	99,55%	87,00%	100,00%	99,30%
	AB	97,62%	100,00%	100,00%	89,29%
	BC	100,00%	100,00%	100,00%	95,18%
	AC	97,59%	100,00%	100,00%	91,57%
	ABT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	BCT	100,00%	100,00%	90,00%	100,00%
	ACT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
RDP2	AT	98,66%	87,05%	100,00%	95,38%
	BT	98,65%	83,86%	100,00%	95,72%
	CT	99,55%	85,20%	100,00%	97,37%
	AB	97,62%	100,00%	100,00%	88,10%
	BC	100,00%	100,00%	100,00%	95,18%
	AC	97,59%	100,00%	100,00%	81,93%
	ABT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	BCT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
ACT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	
ABC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	

Além do método de detecção de faltas proposto ser menos influenciado pela resistência de falta, quando comparado com o método da sobrecorrente, ele apresenta a vantagem de detectar as faltas mais rapidamente, o que é crucial para o bom desempenho dos relés de proteção. Para avaliação do tempo de detecção dos transitórios de falta, a amostra relacionada ao instante em que os transitórios são detectados pelo método proposto k_{1E} , em $E_{dist} = \uparrow$, é comparada com a amostra relacionada à ocorrência dos transitórios de falta no ponto monitorado k_1 (Equação 5.4). Isso resulta no número de amostras relacionadas ao tempo de detecção (k_{detec}), como segue:

$$k_{detec} \approx k_{1E} - \left[k_f + int \left(\frac{f_s d_f}{v} \right) \right], \quad (7.1)$$

sendo $k_{detec} \geq 0$ amostras.

O valor médio das amostras relacionadas ao tempo de detecção de faltas do método proposto, nos RDP1 e RDP2, foi de duas amostras, que corresponde a um tempo médio de detecção de faltas de $100 \mu s$, para uma taxa de amostragem dos RDPs de 20000 amostras/s.

Na Figura 7.3 é ilustrado o histograma do número de faltas detectadas no RDP1 em função do número de amostras relacionadas ao tempo de detecção, por tipo de falta. Por exemplo, nas simulações de faltas AT, 29 faltas foram detectadas na amostra exata em que se deu início a ocorrência dos transitórios, enquanto que: 68 faltas foram detectadas em $k_{detec}=1$ amostra ($50 \mu s$), 75 faltas foram detectadas em $k_{detec}=2$ amostras ($100 \mu s$), 44 faltas foram detectadas em $k_{detec}=3$ amostras ($150 \mu s$), etc. De acordo com a Figura 7.3, praticamente todas as faltas foram detectadas em menos de 4 amostras ($\leq 200 \mu s$).

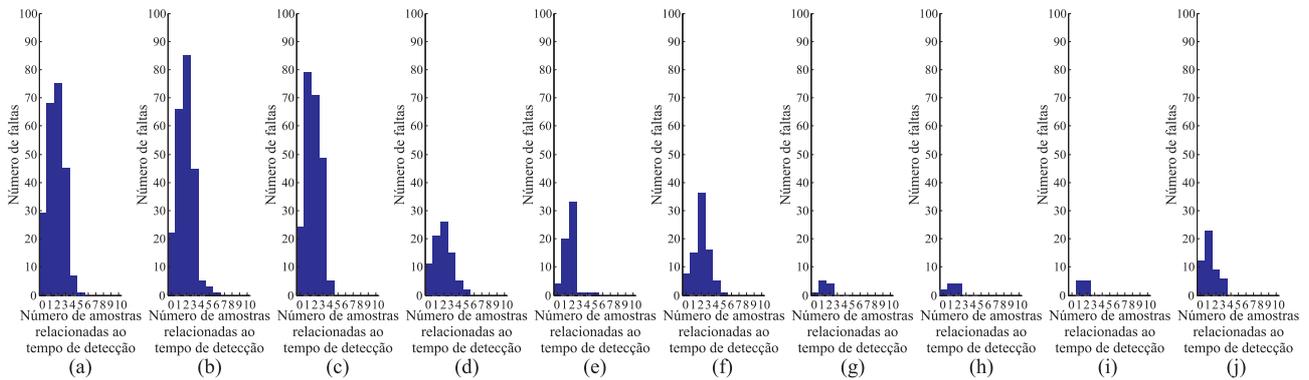


Figura 7.3. Histograma do número de faltas detectadas no RDP1 em função do número de amostras relacionadas ao tempo de detecção: (a) falta AT; (b) falta BT; (c) falta CT; (d) falta AB; (e) falta BC; (f) falta AC; (g) falta ABT; (h) falta BCT; (i) falta ACT; (j) falta ABC.

Com relação ao método da sobrecorrente, cuja detecção da falta é baseada no aumento do módulo dos fasores de corrente acima de um limiar, o valor médio das amostras relacionadas ao tempo de detecção de faltas foi de aproximadamente 68 amostras nos RDP1 e RDP2. Isso corresponde a um tempo médio de detecção de faltas de 3,4 ms para uma taxa de amostragem dos RDPs de 20000 amostras/s.

Na Figura 7.4 é ilustrado um registro oscilográfico gerado pelo RDP1 durante uma falta AT na LT1, com $\theta_f=144,7^\circ$, $r_f=16,5 \Omega$ e $d_f=45$ km da barra 1, destacando-se o instante de detecção da falta pelo método proposto (2 amostras) e pelo método da sobrecorrente (178 amostras).

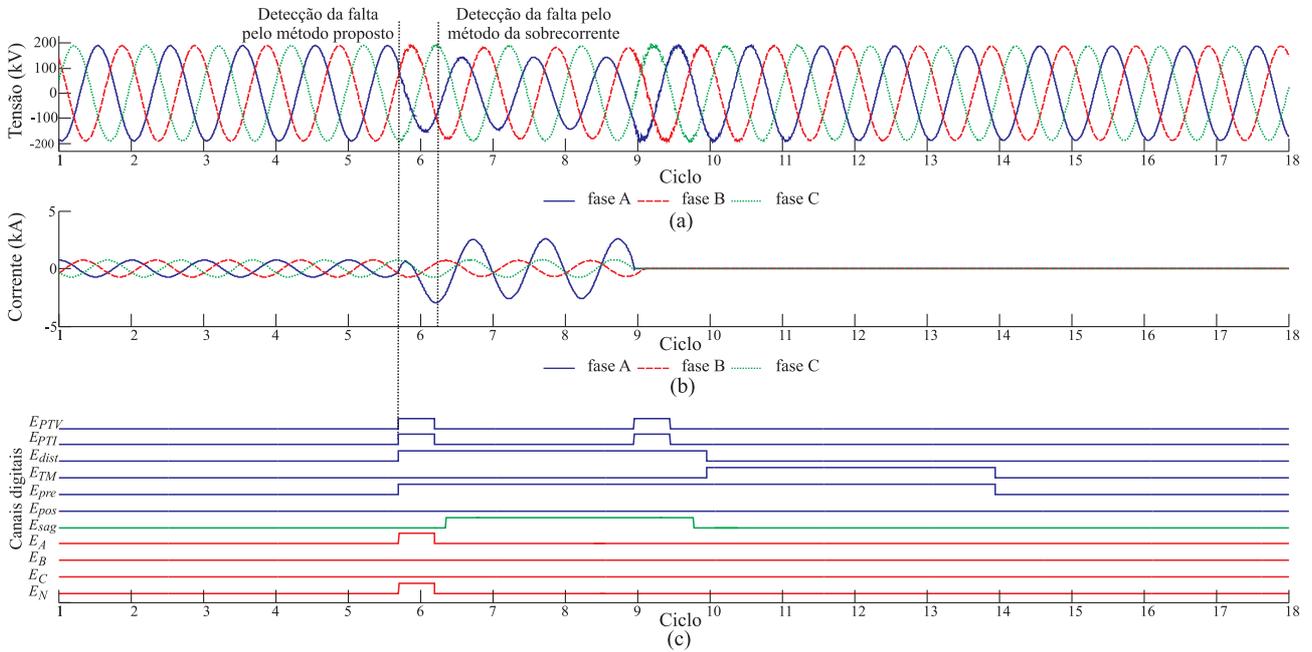


Figura 7.4. Registro oscilográfico do RDP1 obtido na simulação em tempo real de uma falta AT: (a) tensões; (b) correntes; (c) canais digitais com o diagnóstico da falta.

A taxa de acerto na classificação de faltas, por tipo de falta, obtido pelo método proposto e pelo método da sobrecorrente nos RDP1 e RDP2 também é sumarizado na Tabela 7.2. Independente do ângulo de incidência, da resistência e da distância de falta, todas as faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas nos RDP1 e RDP2 foram classificadas corretamente pelo método proposto, enquanto que uma falta bifásica para terra no RDP1 foi classificada como monofásica, sendo obtida uma taxa de acerto de 99,90% e 100% na classificação de faltas nos RDP1 e RDP2, respectivamente. O método da sobrecorrente apresentou 24 e 28 erros de classificação nos RDP1 e RDP2, respectivamente.

Na Figura 7.5 são ilustradas as coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas dos RDP1 e RDP2. Independente dos parâmetros de falta, todas as coordenadas localizaram-se nos respectivos planos de falta. Nas faltas bifásicas, a coordenada relacionada com a corrente de neutro é aproximadamente zero (cor azul), enquanto que nas faltas monofásicas é maior ou igual a um (cor verde).

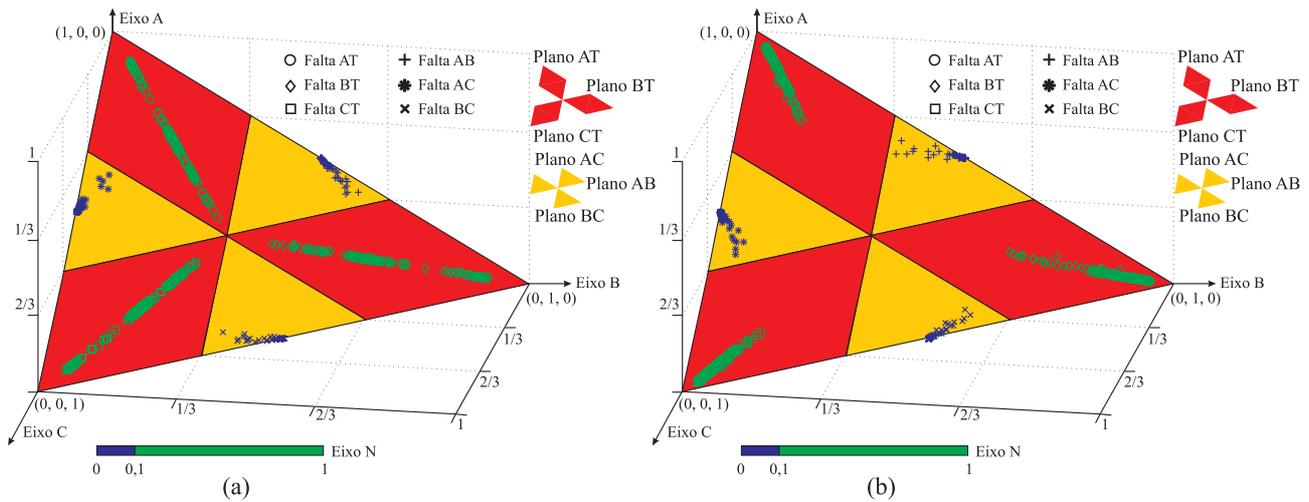


Figura 7.5. Coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Com relação às faltas monofásicas, constatou-se que, quanto mais severos forem os transitórios na corrente de falta no ponto de monitoramento do RDP, maior será o valor da coordenada correspondente à fase com falta, comparada com as coordenadas relacionadas às fases sãs. Portanto, a localização das coordenadas no triângulo de faltas tende ao respectivo vértice.

No sistema elétrico da Figura 7.1, observou-se que os transitórios são mais severos nos sinais monitorados pelo RDP2, na barra 2, quando comparados com os transitórios nos sinais monitorados pelo RDP1, na barra 1, para uma falta simulada à mesma distância de ambos os RDPs. Isto se deve, possivelmente, a localização do transformador de potência, mais próximo à barra 2. Como consequência, as coordenadas das faltas monofásicas obtidas pelo RDP1 estão mais espalhadas nos respectivos planos de falta, enquanto que as coordenadas das faltas monofásicas obtidas pelo RDP2, encontram-se mais concentradas e próximas dos vértices do triângulo de faltas.

Na Figura 7.6 são ilustradas as coordenadas das faltas bifásicas para terra dos RDP1 e RDP2. Constatou-se que a maioria das coordenadas A , B e C das faltas ABT, BCT e ACT localizaram-se nos planos AB, BC ou AC, respectivamente. Como visto no Capítulo 5, dependendo do valor de θ_f , os transitórios de uma falta bifásica para terra apresentam comportamento similar aos transitórios de uma falta bifásica (coordenadas de cor azul na Figura 7.6). Nestes casos, o valor da energia dos coeficientes de aproximação da corrente de neutro foi essencial para confirmação de uma falta bifásica para a terra.

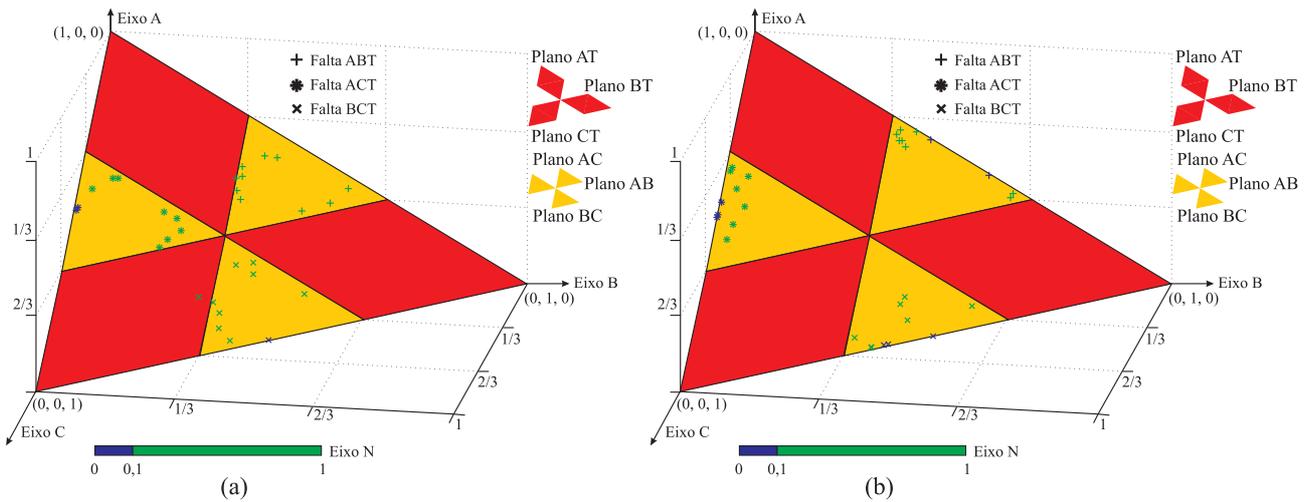


Figura 7.6. Coordenadas das faltas bifásicas para a terra simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Na Figura 7.7 são ilustradas as coordenadas das faltas trifásicas obtidas pelos RDP1 e RDP2. Constatou-se que as coordenadas A , B e C localizaram-se em torno de uma circunferência, circunscrita ao triângulo de faltas. Como visto no Capítulo 5, dependendo do valor de θ_f , os transitórios de uma falta trifásica apresentam comportamento similar aos transitórios de uma falta bifásica. Isto ocorre quando as coordenadas tangenciam um dos lados do triângulo de faltas. Para o método proposto, as coordenadas das faltas trifásicas pertencentes aos planos AB, BC ou AC são classificadas como faltas bifásicas. Porém, com o auxílio das energias dos coeficientes de aproximação das correntes de fase, essas faltas foram todas classificadas como trifásicas.

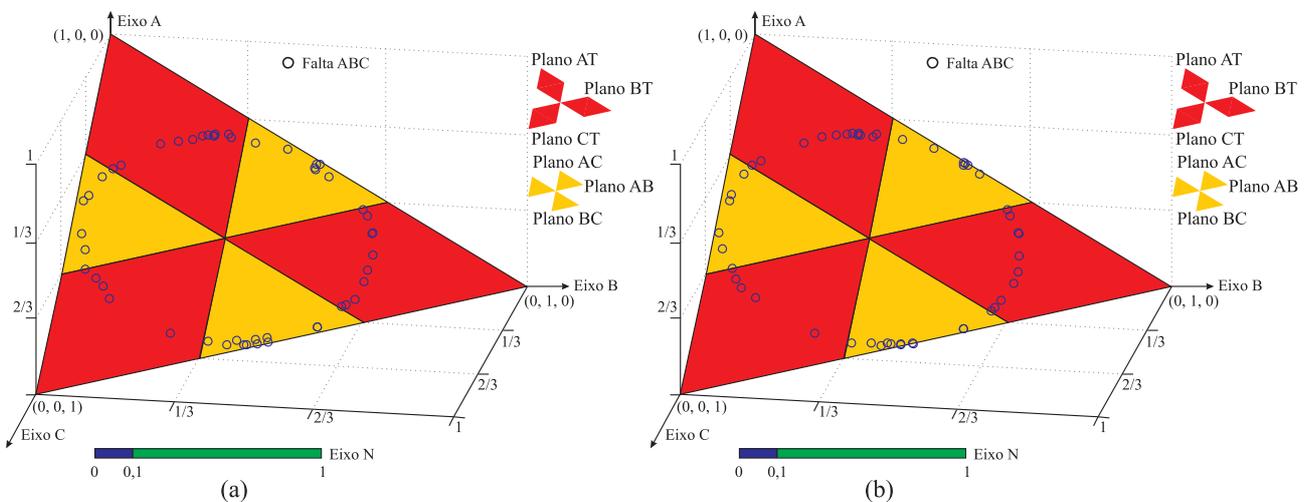


Figura 7.7. Coordenadas das faltas trifásicas simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Na Figura 7.8 é ilustrada a taxa de acerto, por amostra de energia, do método de classificação de faltas proposto em aproximadamente meio ciclo após a detecção dos transitórios de falta. Observa-se que para as faltas monofásicas e bifásicas, o método apresentou um desempenho de 100% de acerto em todas as amostras de energia avaliadas. O método proposto, além de detectar as faltas monofásicas e bifásicas (92% das ocorrências) em um tempo médio de $100 \mu\text{s}$, apresentou uma classificação correta desde a primeira amostra detectada dos transitórios de falta, em tempo real. Portanto, o método proposto é apropriado para aplicações em tempo real em relés digitais para detecção, classificação e localização de faltas.

As faltas trifásicas com diagnóstico correto apresentaram comportamento similar na detecção e classificação de faltas. Por outro lado, em alguns casos, as faltas bifásicas para terra não tiveram classificação correta imediatamente após a detecção, visto que quando a coordenada $N \approx 0$, a falta bifásica para terra é, temporariamente, classificada como bifásica, até que a energia dos coeficientes de aproximação indique a presença da terra na falta.

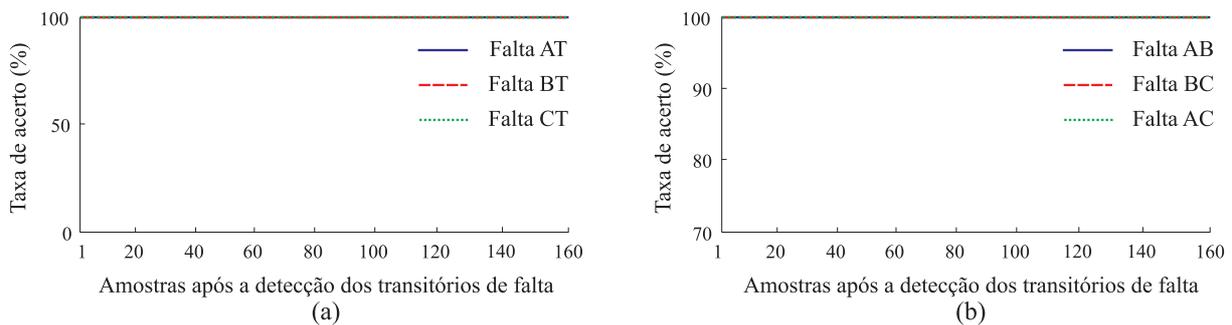


Figura 7.8. Desempenho do método de classificação de faltas, nas amostras de energia em meio ciclo após o instante inicial da falta: (a) faltas monofásicas; (b) falta bifásicas.

No método de diagnóstico proposto, o RDP3 deve detectar, em tempo real, os transitórios relacionados aos instantes inicial e final da falta e classificar a ocorrência como afundamento de tensão ou transitórios de chaveamento, quando a falta ocorre em uma outra linha de transmissão.

Na Figura 7.9 são ilustrados três registros oscilográficos obtidos pelo RDP3 durante a ocorrência de faltas AT na LT1 do sistema elétrico da Figura 7.1, com resistências $r_f = 14,5, 68,8$ e $91,0 \Omega$. As energias dos coeficientes de aproximação das tensões são ilustradas na Figura 7.10. Após a detecção dos transitórios relacionados à falta na linha paralela, o método proposto avalia, em tempo real, a energia dos coeficientes de aproximação das tensões de fase para

confirmação de um afundamento de tensão. Mesmo quando não se tem afundamento de tensão, o método apresenta a vantagem de detectar a ocorrência da falta na linha em paralelo, classificando tal ocorrência como transitórios de chaveamento. Nas Figuras 7.9(a) e 7.9(b) o método proposto classificou as ocorrências como afundamentos de tensão, enquanto que na Figura 7.9(c), a ocorrência foi classificada como transitórios de chaveamento.

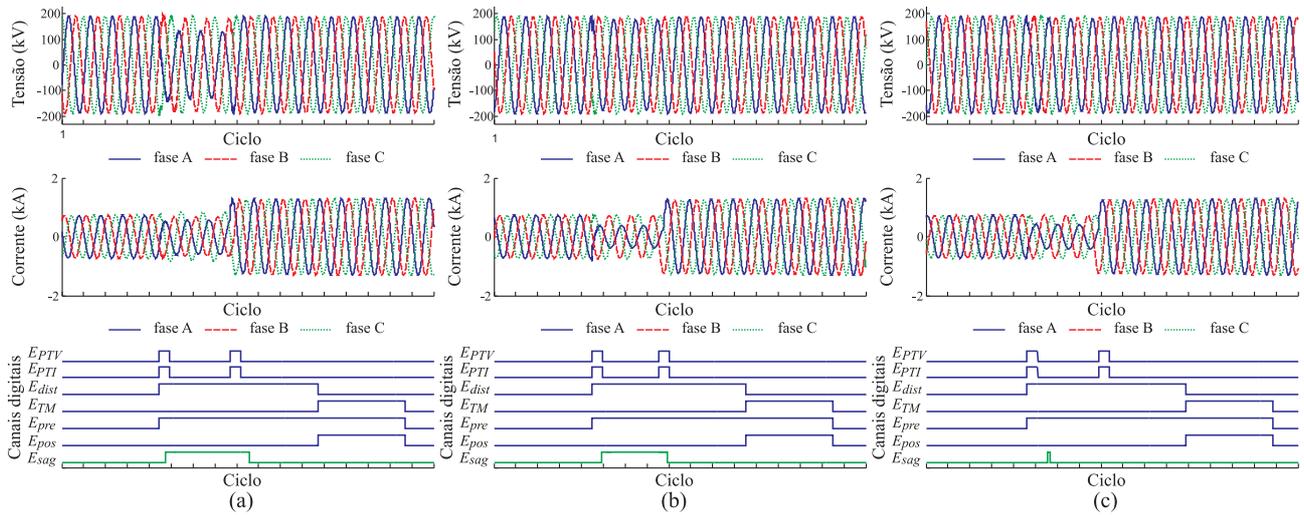


Figura 7.9. Registros oscilográficos do RDP3 obtidos na simulação em tempo real de faltas AT em uma linha paralela: (a) registro com afundamento de tensão; (b) registro com afundamento de tensão amortecido; (c) registro com transitórios de chaveamento.

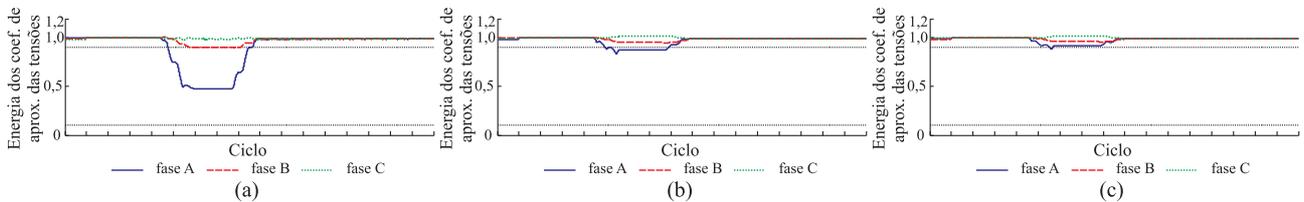


Figura 7.10. Energia janelada das tensões de fase dos registros oscilográficos do RDP3 obtidos na simulação em tempo real de faltas AT em uma linha paralela: (a) registro com afundamento de tensão; (b) registro com afundamento de tensão amortecido; (c) registro com transitórios de chaveamento.

De um total de 1000 faltas simuladas na LT2, 998 ocorrências foram classificadas como afundamento de tensão e apenas duas foram classificadas como transitórios de chaveamento nos RDP3 e RDP4.

Um método convencional para detecção de afundamentos de tensão baseado no valor eficaz das tensões (Apêndice D) foi implementado para comparação dos resultados obtidos com o método proposto. Todas as ocorrências foram detectadas e classificadas como afundamento de tensão pelo método baseado no valor eficaz das tensões.

7.1.2 Base de dados 2: faltas na linha de transmissão 3

O desempenho do método proposto foi avaliado em quatro RDPs com taxa de amostragem de 20000 amostras/s, que monitoravam as linhas LT1 e LT3 do sistema de 230 kV da Figura 7.11. Um total de 1000 faltas ao longo da LT3 foram simuladas com parâmetros de valores aleatórios: $\theta_f \in \{0^\circ, 180^\circ\}$, $r_f \in \{0, 100\} \Omega$ e $d_f \in \{15, 68\}$ km da barra 2. Com relação ao tipo de falta, 67% das faltas foram monofásicas, 25% bifásicas, 3% bifásicas para terra e 5% trifásicas (IEE, 1995; TLEIS, 2008). Após 3 ciclos de duração, os disjuntores D5 e D6 são solicitados à abertura para eliminação da falta. Nestas condições, espera-se que os RDP3 e RDP4 detectem, em tempo real, faltas na LT3, enquanto que os RDP1 e RDP2 detectem afundamentos de tensão na LT1.

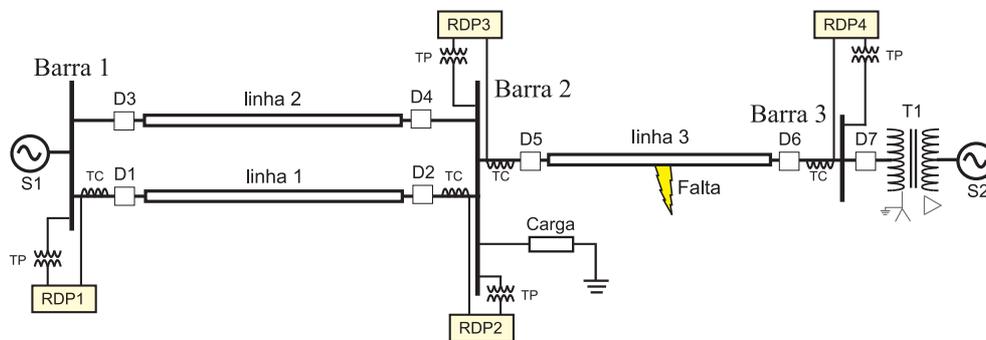


Figura 7.11. Faltas na linha de transmissão 2 do sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE.

Os resultados obtidos com o método proposto para as 1000 faltas simuladas são sumarizados na Tabela 7.3. Os quatro RDPs detectaram distúrbios transitórios em todas as simulações e registraram todas as ocorrências em registros oscilográficos, apresentando uma taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios.

O RDP3 não detectou os transitórios de falta em 12 simulações, detectando apenas os transitórios na eliminação das faltas e classificando as faltas como desligamento, apresentando uma taxa de acerto de 98,80% na classificação dos distúrbios (detecção de faltas). O RDP4 classificou 11 ocorrências como desligamento, apresentando uma taxa de acerto de 98,90% na classificação dos distúrbios. Com relação aos RDP1 e RDP2, as ocorrências foram classificadas como afundamentos de tensão ou transitórios de chaveamento.

O instante inicial das faltas foi identificado com um erro médio de 2 amostras ($100 \mu\text{s}$ para $f_s=20000$ amostras/s) nos RDP3 e RDP4. Com relação à classificação das faltas, os RDP3 e RDP4 apresentaram uma taxa de acerto de 100%.

Tabela 7.3. Resultados obtidos com a ocorrência de faltas na linha 3 do sistema elétrico de 230 kV.

RDP	Quantidade de simulações	Taxa de acerto na detecção de distúrbios	Taxa de acerto na classificação de distúrbios	Tempo médio de detecção do instante inicial das faltas	Taxa de acerto na classificação de faltas
RDP1	1000	100%	100,00%	-	-
RDP2	1000	100%	100,00%	-	-
RDP3	1000	100%	98,80%	100 μs	100%
RDP4	1000	100%	98,90%	100 μs	100%

Na Figura 7.12 são ilustrados os registros oscilográficos gerados pelos RDP1, RDP2, RDP3 e RDP4 durante uma falta AT na LT1, com $\theta_f=120,9^\circ$, $r_f=9,9 \Omega$ e $d_f=37$ km da barra 2. Pela análise dos canais analógicos e digitais desses registros, observa-se que todos os RDPs detectaram, em tempo real, os instantes relacionados ao início e fim da ocorrência ($E_{PT}=\uparrow$). Os RDP3 e RDP4 classificaram o distúrbio como falta ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $k_{nE}-k_{mE}>2\Delta k$). A falta foi classificada, em tempo real, como falta AT em todas as amostras durante um período de meio ciclo após a detecção do evento ($E_A=1$, $E_B=0$, $E_C=0$ e $E_N=1$ em meio ciclo após $E_{dist}=\uparrow$). Os RDP1 e RDP2 classificaram os distúrbios como afundamento de tensão ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$ em $E_{TM}=\downarrow$ e $E_{sag}=\uparrow$ em mais de meio ciclo durante $E_{dist}=1$).

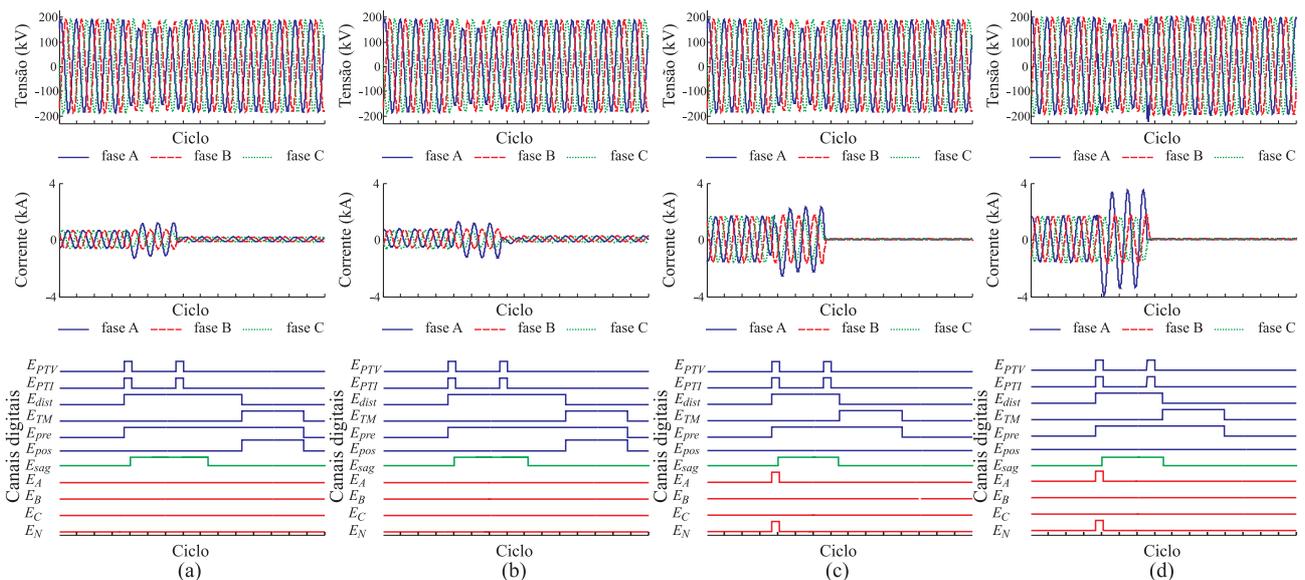


Figura 7.12. Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta AT: (a) RDP1; (b) RDP2; (c) RDP3; (d) RDP4.

O desempenho do método proposto e do método da sobrecorrente no diagnóstico, por tipo de falta, obtido pelos RDP3 e RDP4 é sumarizado na Tabela 7.4. Com relação à taxa de acerto na detecção de faltas, 6 faltas monofásicas e 6 faltas bifásicas não foram detectadas pelo método proposto no RDP3, enquanto que no RDP4, 7 faltas monofásicas e 4 faltas bifásicas não foram detectadas. Todas as faltas bifásicas para a terra e trifásicas foram detectadas com sucesso. Por outro lado, 89 faltas monofásicas não foram detectadas pelo método da sobrecorrente no RDP3, apresentando uma taxa de acerto de 91,10%, enquanto que todas as faltas no RDP4 foram detectadas com sucesso.

A taxa de acerto na classificação de faltas, por tipo de falta, obtido pelo método proposto e pelo método da sobrecorrente nos RDP3 e RDP4 também é sumarizado na Tabela 7.4. Constatou-se que independente do ângulo de incidência, da resistência e da distância de falta, todas as faltas nos RDP3 e RDP4 foram classificadas corretamente pelo método proposto. O método da sobrecorrente também apresentou uma taxa de acerto de 100% na classificação das faltas detectadas.

Tabela 7.4. Resultados da detecção e classificação de faltas na linha 3 do sistema elétrico de 230 kV.

RDP	Tipo de falta	Acerto na detecção de faltas		Acerto na classificação de faltas	
		Método proposto	Método da sobrecorrente	Método proposto	Método da sobrecorrente
RDP3	AT	98,66%	86,61%	100,00%	100,00%
	BT	98,65%	86,55%	100,00%	100,00%
	CT	98,65%	87,00%	100,00%	100,00%
	AB	97,62%	100,00%	100,00%	100,00%
	BC	96,39%	100,00%	100,00%	100,00%
	AC	98,80%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	BCT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ACT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
RDP4	AT	99,11%	100,00%	100,00%	100,00%
	BT	99,10%	100,00%	100,00%	100,00%
	CT	98,65%	100,00%	100,00%	100,00%
	AB	98,81%	100,00%	100,00%	100,00%
	BC	97,59%	100,00%	100,00%	100,00%
	AC	98,80%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	BCT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ACT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Na Figura 7.13 são ilustradas as coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas dos RDP3 e RDP4. Observa-se que independente dos parâmetros de falta, todas as coordenadas localizaram-se nos respectivos planos de falta. Nas faltas bifásicas, a coordenada relacionada à corrente de neutro é aproximadamente zero (cor azul), enquanto que nas faltas monofásicas é maior ou igual a um (cor verde).

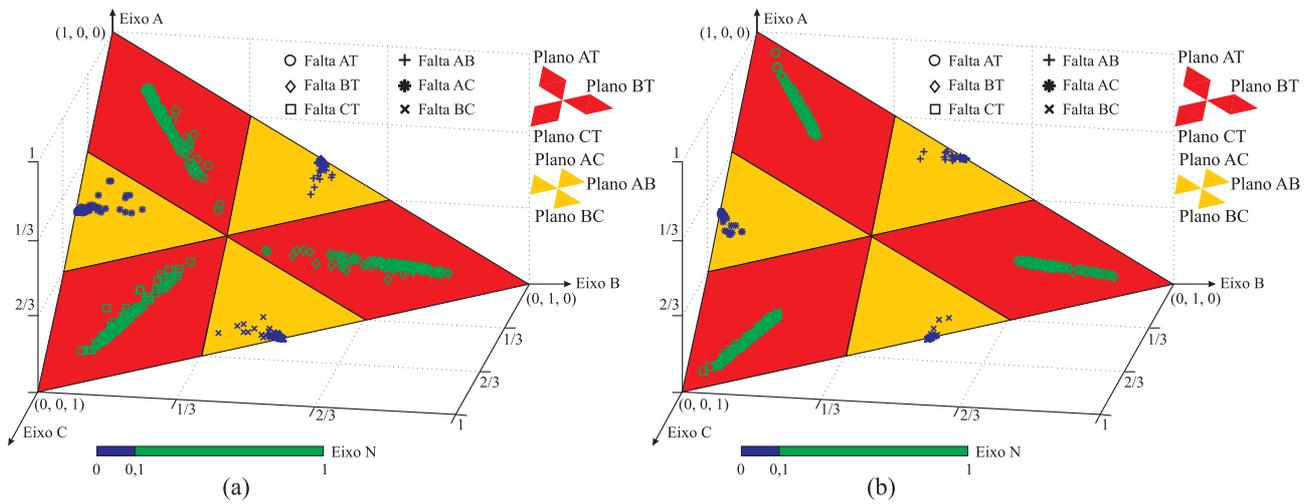


Figura 7.13. Coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas simuladas na linha de transmissão 3 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP3; (b) RDP4.

Na Figura 7.14 são ilustradas as coordenadas das faltas bifásicas para terra dos RDP1 e do RDP2. Todas as coordenadas A , B e C das faltas ABT, BCT e ACT localizaram-se nos planos AB, BC ou AC, respectivamente. Porém, algumas coordenadas apresentaram cor azul, similar a uma falta bifásica. Nestes casos, o valor da energia dos coeficientes de aproximação da corrente de neutro foi essencial para confirmação das faltas bifásicas para a terra.

Na Figura 7.15 são ilustradas as coordenadas das faltas trifásicas dos RDP3 e RDP4. As coordenadas A , B e C localizaram-se em torno de uma circunferência circunscrita ao triângulo de faltas. Dependendo do valor de θ_f , as coordenadas das faltas trifásicas localizaram-se nos planos das faltas bifásicas com a cor azul, equivalente a uma falta bifásica. Nestes casos, as energias dos coeficientes de aproximação das correntes de fase são utilizadas, em tempo real, para confirmação das faltas trifásicas.

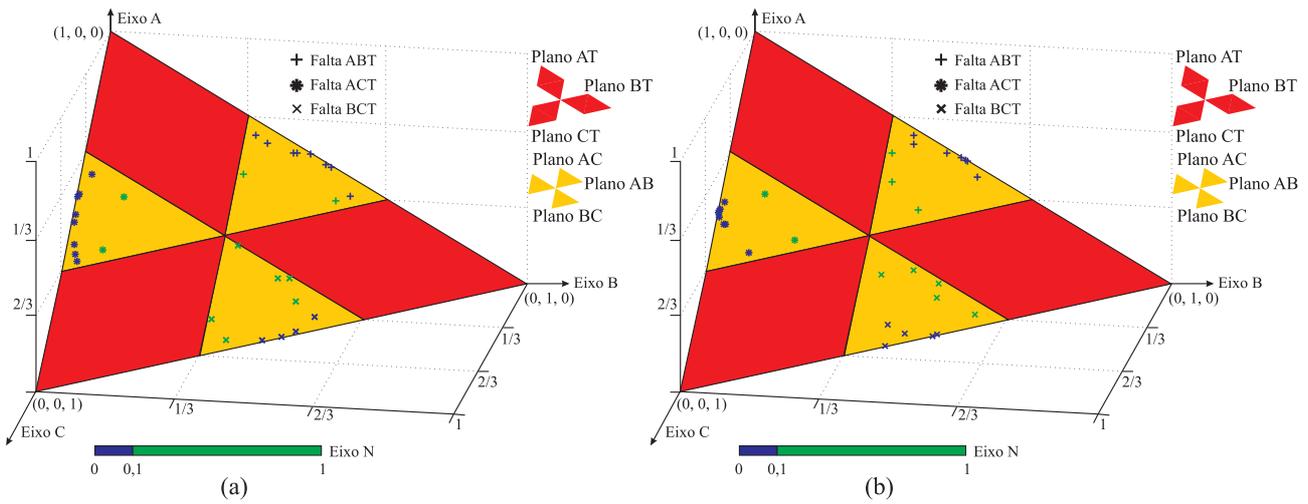


Figura 7.14. Coordenadas das faltas bifásicas para a terra simuladas na linha de transmissão 3 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP3; (b) RDP4.

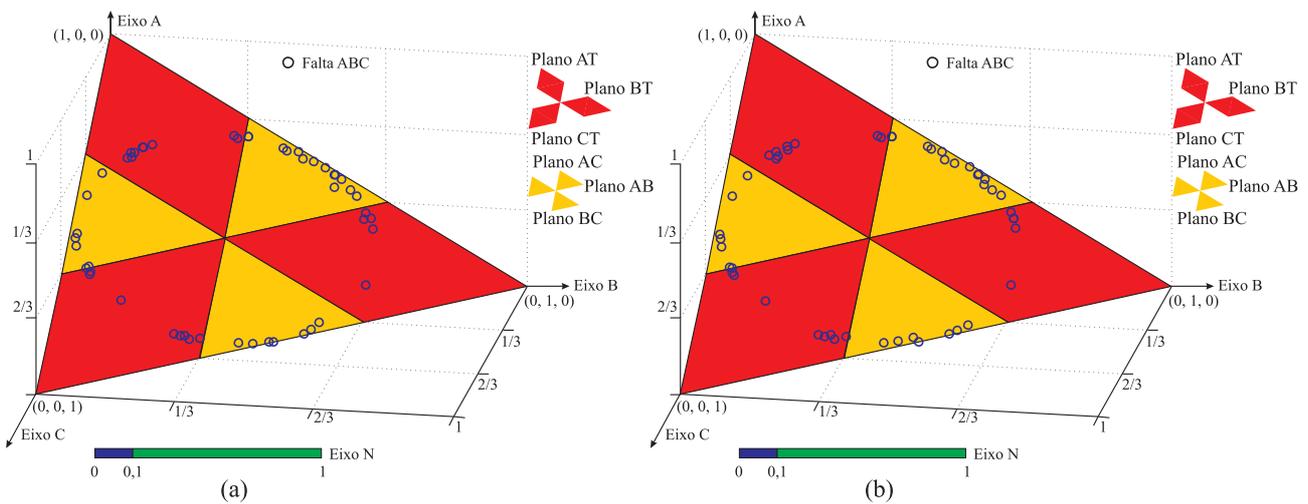


Figura 7.15. Coordenadas das faltas trifásicas simuladas na linha de transmissão 3 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP3; (b) RDP4.

7.1.3 Base de dados 3: faltas evolutivas na linha de transmissão 1

O desempenho do método proposto foi avaliado em quatro RDPs com taxa de amostragem de 20000 amostras/s, que monitoravam as linhas LT1 e LT2 do sistema de 230 kV da Figura 7.16. Um total de 1000 faltas evolutivas (250 faltas AT+ACT, 250 faltas BT+BCT, 250 faltas AB+ABT e 250 faltas AB+ABC) ao longo da LT1 foram simuladas com parâmetros de valores aleatórios: $\theta_f \in \{0^\circ, 180^\circ\}$, $r_f \in \{0, 100\} \Omega$ e $d_f \in \{15, 68\}$ km da barra 1. Todas as faltas tiveram duração de quatro ciclos, com instante de mudança de falta aleatória de um a três ciclos

após a falta. Após os quatro ciclos de duração, os disjuntores D1 e D2 abriram para eliminação da falta. Nestas condições, espera-se que os RDP1 e RDP2 detectem, em tempo real, faltas evolutivas na LT1, enquanto que os RDP3 e RDP4 detectem afundamentos de tensão na LT2.

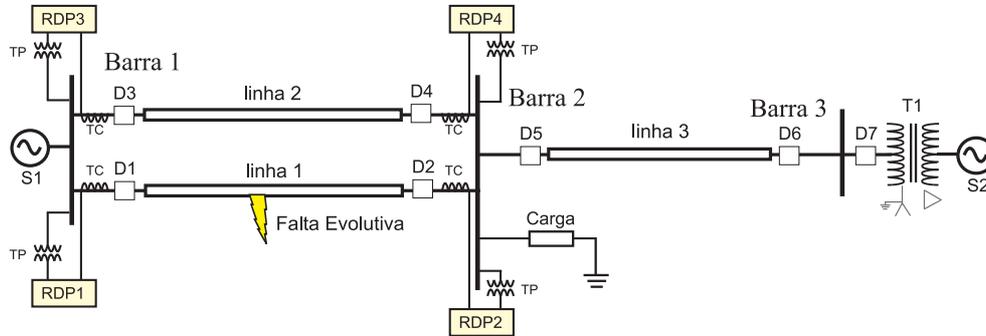


Figura 7.16. Faltas evolutivas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE.

Na Figura 7.17 são ilustrados os registros oscilográficos gerados pelos RDPs durante a ocorrência da falta evolutiva AT+ACT na LT1, com $\theta_f=105,3^\circ$, $r_f=11,9 \Omega$ e $d_f=53$ km da barra 1. Pela análise dos canais analógicos e digitais desses registros, observa-se que todos os RDPs detectaram, em tempo real, os instantes relacionados ao início e fim da ocorrência, assim como o instante em que a falta mudou de tipo ($E_{PTV}=\uparrow$ ou $E_{PTI}=\uparrow$). Os RDP1 e RDP2 classificaram o distúrbio como falta ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $k_{nE}-k_{mE}>2\Delta k$), enquanto que os RDP3 e RDP4 classificaram os distúrbios como afundamento de tensão ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $E_{sag}=\uparrow$ por mais de meio ciclo durante $E_{dist}=1$).

Com relação aos RDP1 e RDP2, a primeira etapa da falta foi classificada, em tempo real, como falta AT em todas as amostras durante um período de meio ciclo após a detecção do evento ($E_A=1$, $E_B=0$, $E_C=0$ e $E_N=1$), enquanto que a segunda etapa da falta foi classificada como BT na maioria das amostras durante um período de meio ciclo após a detecção do segundo PT ($E_A=0$, $E_B=1$, $E_C=0$ e $E_N=1$), que corresponde a uma falta ABT ao levar em consideração a classificação como falta AT no primeiro estágio da falta.

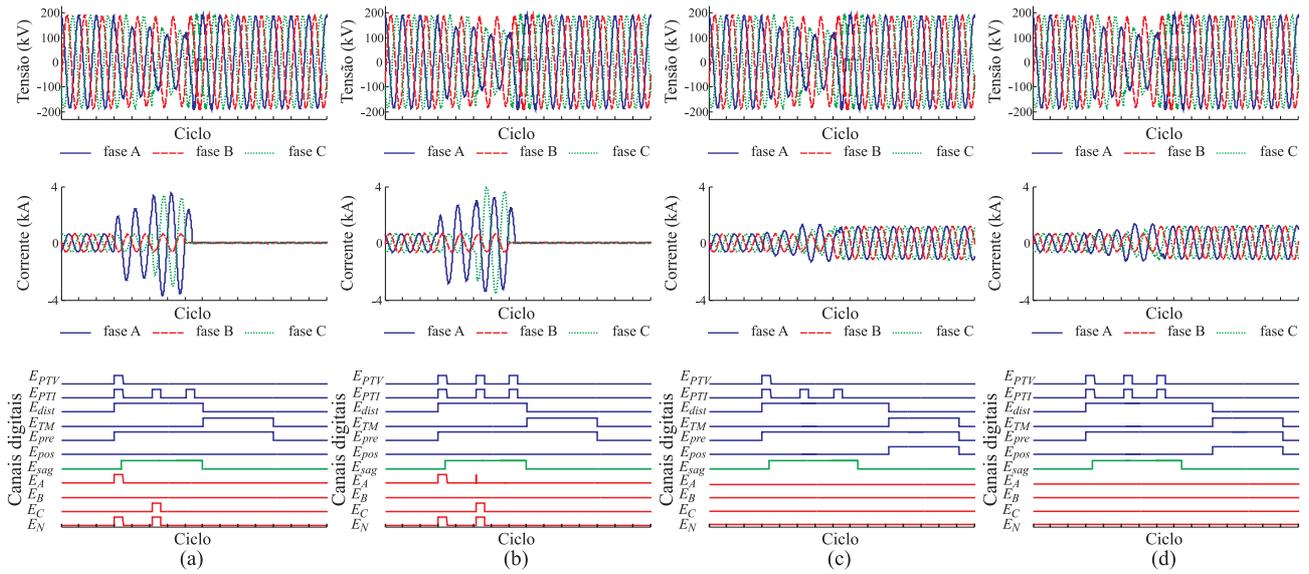


Figura 7.17. Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta evolutiva AT+ACT: (a) RDP1; (b) RDP2; (c) RDP3; (d) RDP4.

Os resultados obtidos com o método proposto para as 1000 faltas evolutivas simuladas são sumarizados na Tabela 7.5. Os quatro RDPs detectaram distúrbios transitórios em todas as simulações e registraram todas as ocorrências em registros oscilográficos, apresentando uma taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios.

Os RDP1 e RDP2 não detectaram os transitórios da primeira etapa da falta em 4 e 6 simulações, respectivamente. Porém, os transitórios na segunda etapa da falta foram detectados em todos os casos, apresentando uma taxa de acerto de 100% na classificação dos distúrbios (detecção de faltas). Com relação aos RDP3 e RDP4, os registros foram classificados como afundamentos de tensão, sendo alguns casos classificados como transitórios de chaveamento.

O instante inicial das faltas foi identificado com um tempo médio equivalente a duas amostras ($100 \mu s$ para $f_s=20000$ amostras/s) nos RDP1 e RDP2. Com relação à classificação das faltas, os RDP1 e RDP2 apresentaram uma taxa de acerto de 100% na primeira e na segunda etapa da falta. O desempenho na detecção e classificação de faltas, por tipo de falta, obtido pelos RDP1 e RDP2 é apresentado na Tabela 7.6.

Tabela 7.5. Resultados obtidos nas simulações em tempo real de faltas evolutivas do sistema elétrico de 230 kV.

RDP	Quantidade de simulações	Taxa de acerto na detecção de distúrbios	Taxa de acerto na classificação de distúrbios	Taxa de acerto na classificação de faltas	
				Etapa 1	Etapa 2
RDP1	1000	100 %	100 %	100 %	100 %
RDP2	1000	100 %	100 %	100 %	100 %
RDP3	1000	100 %	100 %	-	-
RDP4	1000	100 %	100 %	-	-

Tabela 7.6. Resultados da classificação de faltas evolutivas no sistema elétrico de 230 kV.

RDP	Primeira etapa da falta			Segunda etapa da falta		
	Tipo de falta	Taxa de acerto na detecção	Taxa de acerto na classificação	Tipo de falta	Taxa de certo na detecção	Taxa de acerto na classificação
RDP1	AT	100%	100%	ACT	100%	100%
	BT	99,60%	100%	BCT	100%	100%
	AB	99,20%	100%	ABT	100%	100%
	AB	99,60%	100%	ABC	100%	100%
RDP2	AT	100%	100%	ACT	100%	100%
	BT	99,20%	100%	BCT	100%	100%
	AB	99,60%	100%	ABT	100%	100%
	AB	98,80%	100%	ABC	100%	100%

Na Figura 7.18 são ilustradas as coordenadas das faltas evolutivas AT+ACT dos RDP1 e RDP2. Observa-se que independente dos parâmetros de falta, todas as coordenadas da primeira etapa da falta localizaram-se no plano das faltas AT. Na segunda etapa da falta, entretanto, uma parte das coordenadas localizou-se: no plano das faltas AC com a cor verde, que corresponde a uma falta ACT; no plano das faltas CT com a cor verde, que corresponde a uma falta CT. Ambos os casos (falta ACT ou CT) na segunda etapa da falta é considerada uma falta ACT, visto que a primeira etapa é uma falta AT. Portanto, em tempo real, o método classificou corretamente todas as faltas evolutivas AT+ACT.

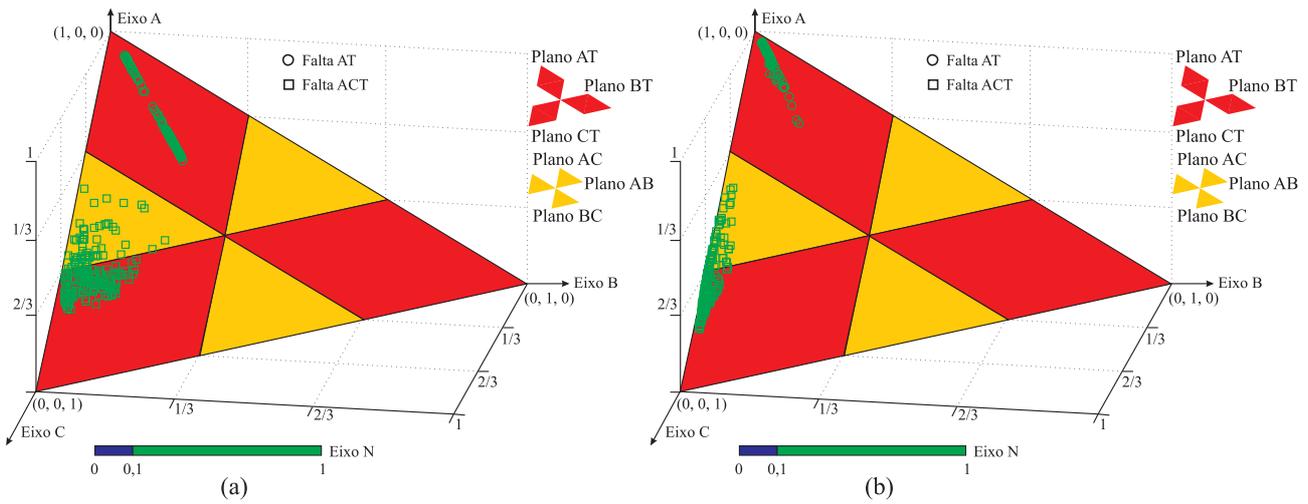


Figura 7.18. Coordenadas das faltas evolutivas AT+ACT simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Na Figura 7.19 são ilustradas as coordenadas das faltas evolutivas BT+BCT dos RDP1 e RDP2. Observa-se que independente dos parâmetros de falta, todas as coordenadas da primeira etapa da falta localizaram-se no plano das faltas BT. Na segunda etapa da falta, as coordenadas localizaram-se: no plano das faltas BC com a cor verde; no plano das faltas CT com a cor verde. Isso corresponde a uma falta BCT, visto que a primeira etapa é uma falta BT. Portanto, em tempo real, o método classificou corretamente todas as faltas evolutivas BT+BCT.

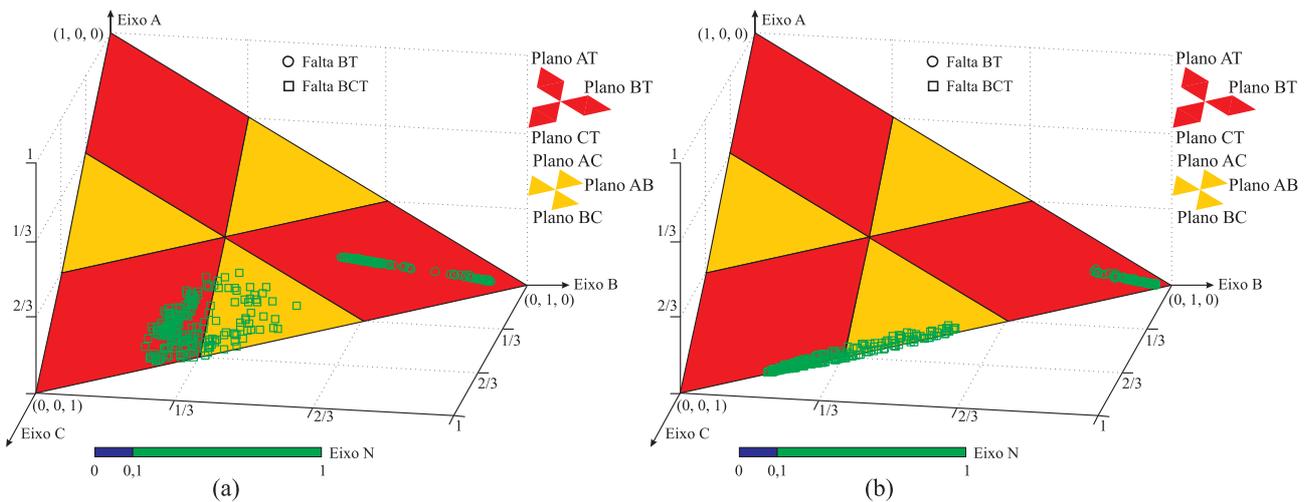


Figura 7.19. Coordenadas das faltas evolutivas BT+BCT simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Na Figura 7.20 são ilustradas as coordenadas das faltas evolutivas AB+ABT dos RDP1 e RDP2. Observa-se que independente dos parâmetros de falta, todas as coordenadas da primeira etapa da falta localizaram-se no plano das faltas AB com a cor azul, que corresponde a uma falta AB. Na segunda etapa da falta, entretanto, uma parte das coordenadas localizou-se: no plano das faltas AB com a cor verde, que corresponde a uma falta ABT; no plano das faltas AT com a cor verde, que corresponde a uma falta AT; no plano das faltas BT com a cor verde, que corresponde a uma falta BT. Nestes três casos, falta AT, BT ou ABT é considerada uma falta ABT, visto que a primeira etapa é uma falta AB. Portanto, em tempo real, o método classificou corretamente todas as faltas evolutivas AB+ABT.

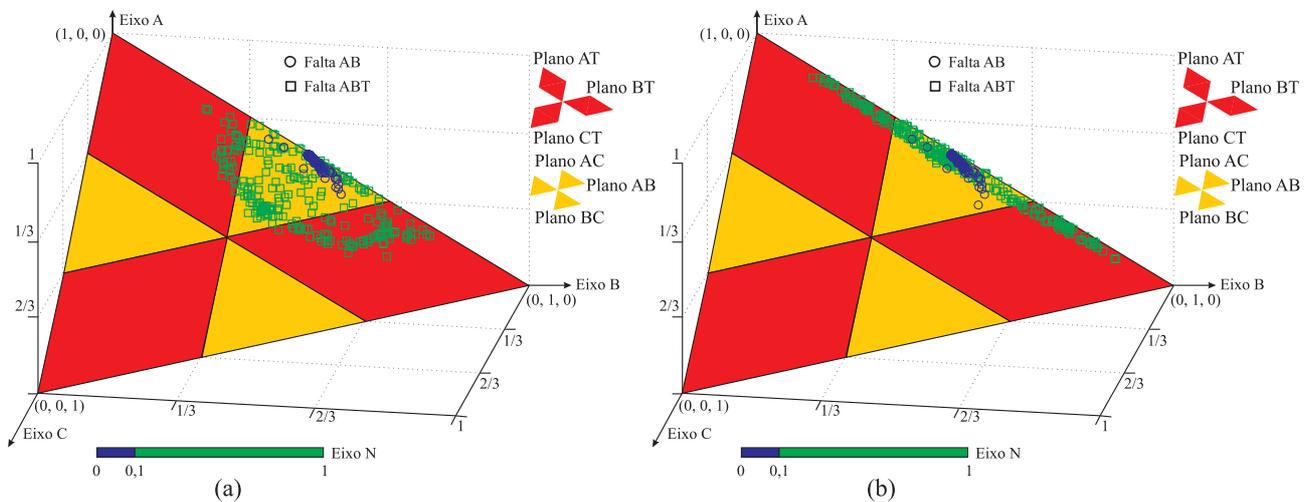


Figura 7.20. Coordenadas das faltas evolutivas AB+ABT simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Na Figura 7.21 são ilustradas as coordenadas das faltas evolutivas AB+ABC dos RDP1 e RDP2. Observa-se que independente dos parâmetros de falta, todas as coordenadas da primeira etapa da falta localizaram-se no plano das faltas AB e com a cor azul, que corresponde a uma falta AB. Na segunda etapa da falta, entretanto, uma parte das coordenadas localizou-se: no plano das faltas monofásicas com a cor azul, o que corresponde a uma falta ABC; no plano das faltas bifásicas com a cor azul, o que corresponde a uma falta AB, BC ou AC. A falta ABC, AC ou BC é considerada falta ABC, visto que a primeira etapa é uma falta AB. Por outro lado, o método confirmou as faltas ABC, cujas coordenadas se localizaram no plano AB ao analisar as energias dos coeficientes de aproximação das correntes de falta. Portanto, todas as faltas foram classificadas como AB+ABC.

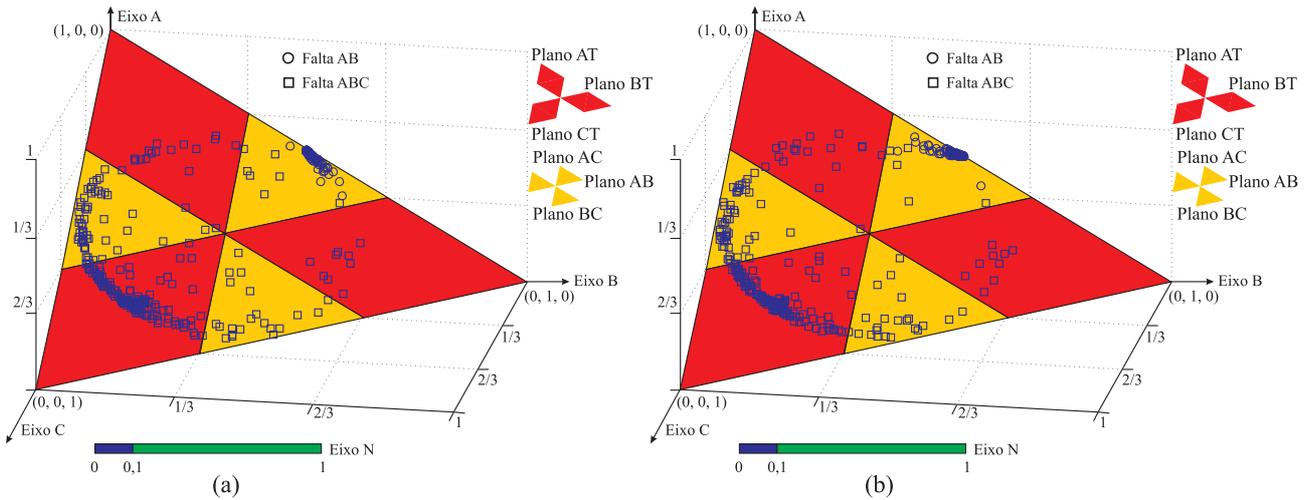


Figura 7.21. Coordenadas das faltas evolutivas AB+ABC simuladas na linha de transmissão 1 do sistema elétrico de 230 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

7.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EM SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL - SISTEMA ELÉTRICO DE 500 KV

7.2.1 Base de dados 4: Faltas Seguidas por Religamento Automático da Linha de Transmissão

O desempenho do método proposto foi avaliado em dois RDPs com taxa de amostragem de 15360 amostras/s, que monitoravam a LT do sistema de 500 kV, descrito na Seção 6.2.2. Um total de 1000 faltas ao longo da LT (Figura 7.22) foram simuladas com parâmetros de valores aleatórios: $\theta_f \in \{0^\circ, 180^\circ\}$, $r_f \in \{0, 100\} \Omega$ e $d_f \in \{15, 385\}$ km da barra 1. Com relação ao tipo de falta, 67% das faltas foram monofásicas, 25% bifásicas, 3% bifásicas para terra e 5% trifásicas (IEE, 1995; TLEIS, 2008). Em cada simulação, após aproximadamente 4 ciclos de duração, os disjuntores D1 e D2 abriram para eliminação da falta. Em seguida, após 15 e 30 ciclos, os disjuntores D1 e D2 foram, respectivamente, solicitados a realizarem manobras de religamento automático da LT. Nestas condições, espera-se que os RDP1 e RDP2 detectem, em tempo real, faltas seguidas por manobras de religamentos, gerando registros oscilográficos com múltiplos distúrbios (Falta + Energização/Transitórios de chaveamento + Energização/Transitórios de chaveamento).

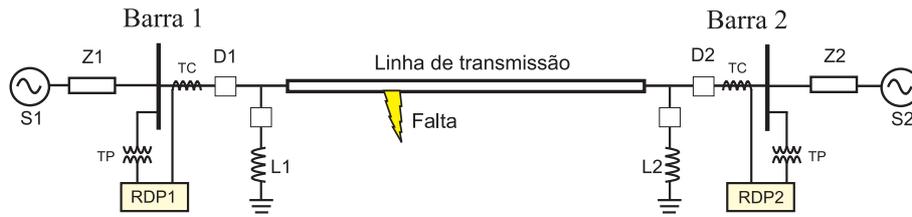


Figura 7.22. Sistema elétrico de 500 kV com falha na linha de transmissão.

Na Figura 7.23 são ilustrados os registros oscilográficos gerados pelos RDP1 e RDP2 durante uma falha AT na LT, com $\theta_f=107,1^\circ$, $r_f=9,8 \Omega$ e $d_f=230$ km da barra 1, seguido pelos religamentos em ambos os terminais da linha. Pela análise dos canais analógicos e digitais desses registros, observa-se que os RDPs detectaram, em tempo real, os instantes relacionados ao início e fim da falha e os instantes de religamentos (em $E_{PTV}=\uparrow$ ou $E_{PTI}=\uparrow$).

O RDP1 classificou os distúrbios como falha ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $k_{nE}-k_{mE}>2\Delta k$) + energização ($E_{pre}=0$ e $E_{pos}=1$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $nPT=1$) + transitórios de chaveamento ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=1$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $nPT=1$), enquanto que o RDP2 classificou os distúrbios como falha ($E_{pre}=1$ e $E_{pos}=0$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $k_{nE}-k_{mE}>2\Delta k$) + energização ($E_{pre}=0$ e $E_{pos}=1$ em $E_{TM}=\downarrow$, com $nPT=1$). A falha foi classificada, em tempo real, como falha AT em todas as amostras durante um período de meio ciclo após a detecção do evento ($E_A=1$, $E_B=0$, $E_C=0$ e $E_N=1$ em meio ciclo após $E_{dist}=\uparrow$), com exceção das duas primeiras amostras, classificadas como falha trifásica.

Os resultados obtidos com o método proposto nas simulações em tempo real das 1000 faltas seguidas por religamentos são sumarizados na Tabela 7.7. Os dois RDPs detectaram distúrbios transitórios em todas as simulações e registraram todas as ocorrências em registros oscilográficos, apresentando uma taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios.

Com relação ao primeiro distúrbio transitório, o RDP1 não detectou os transitórios de falha em 2 simulações, detectando apenas os transitórios na eliminação das faltas. Nestes casos, as faltas foram classificadas como desligamentos, sendo obtida uma taxa de acerto de 99,80% na identificação dos distúrbios (faltas). O RDP2, por outro lado, apresentou uma taxa de acerto de 99,90% na identificação das faltas, visto que uma falha foi classificada como desligamento. O instante inicial das faltas foi identificado com um erro médio de duas amostra ($\approx 130 \mu s$ para $f_s=15360$ amostras/s) nos RDP1 e RDP2.

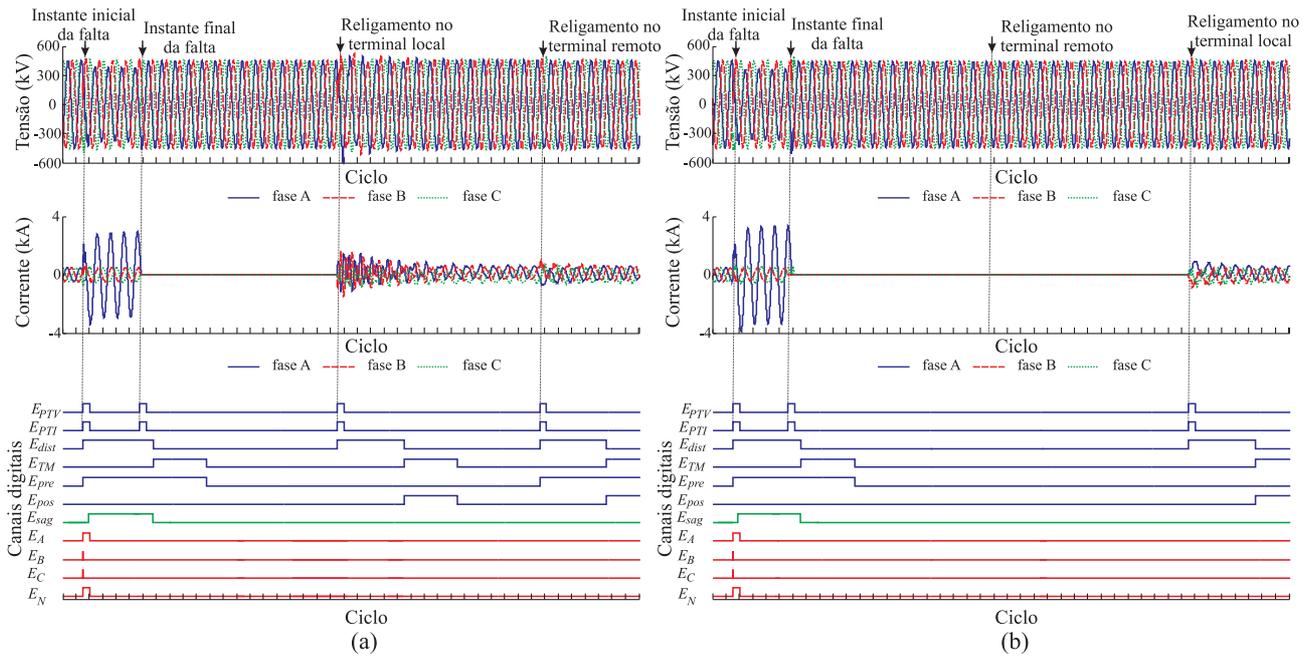


Figura 7.23. Registros oscilográficos obtidos na simulação em tempo real de uma falta AT seguido de religamento automático: (a) RDP1; (b) RDP2.

Com relação às manobras de religamento automático, o RDP1 detectou os transitórios nos religamentos de ambos os terminais, classificando corretamente os distúrbios como energização + transitórios de chaveamento. O RDP2, por outro lado, detectou apenas os transitórios no religamento local, classificando a ocorrência como energização. O religamento remoto não foi obtido pelo fato do TPC está conectado na barra 2, e portanto, não possui acoplamento elétrico com a barra 1. Esse tipo de distúrbio está associado a transitórios apenas nas tensões (Seção 4.6).

Tabela 7.7. Resultados obtidos com a ocorrência de múltiplos distúrbios no sistema elétrico de 500 kV.

RDP	Quantidade de simulações	Taxa de acerto na detecção de distúrbios	Taxa de acerto na classificação de distúrbios		
			Falta	Religamento 1	Religamento 2
RDP1	1000	100%	99,80%	100% (Energização)	100% (Trans. Chav.)
RDP2	1000	100%	99,90%	-	100% (Energização)

O desempenho do método proposto no diagnóstico, por tipo de falta, obtido pelos RDP1 e RDP2 é sumarizado na Tabela 7.8. Os transitórios de falta não foram detectados em apenas duas faltas AT no RDP1 e uma falta AT no RDP2. Para as faltas AT, portanto, a taxa de acerto na detecção foi de 99,80% e 99,90% nos RDP1 e RDP2, respectivamente. Todas as

faltas monofásicas e bifásicas (92% das faltas) foram classificadas corretamente. Duas faltas ACT foram classificadas como falta AT pelo RDP1, sendo obtida uma taxa de acerto de 80%. Com relação às faltas trifásicas, os RDP1 e RDP2 apresentaram uma taxa de acerto de 100%.

O desempenho do método da sobrecorrente também é apresentado na Tabela 7.8. Das 670 faltas monofásicas, apenas 3 faltas AT não foram detectadas pelo método da sobrecorrente no RDP2. As demais faltas foram detectadas corretamente pelos RDP1 e RDP2. Com relação à classificação das faltas, todas as faltas bifásicas, bifásicas para a terra e trifásicas foram detectadas com sucesso pelos RDPs, com exceção de três faltas ABT e uma falta BCT no RDP2. No entanto, o método da sobrecorrente apresentou um baixo desempenho na classificação das faltas monofásicas, visto que em muitos casos, as correntes sãs apresentaram sobrecorrente transitória no primeiro ciclo de falta, ultrapassando o limiar de 20% do valor da corrente de pré-falta.

Tabela 7.8. Resultados da detecção e classificação de faltas no sistema elétrico de 230 kV.

RDP	Tipo de falta	Taxa de acerto na detecção de faltas		Taxa de acerto na classificação de faltas	
		Método proposto	Método da sobrecorrente	Método proposto	Método da sobrecorrente
RDP1	AT	99,11%	100,00%	100,00%	57,14%
	BT	100,00%	100,00%	100,00%	50,45%
	CT	100,00%	100,00%	100,00%	51,12%
	AB	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	BC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	AC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	BCT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ACT	100,00%	100,00%	80,00%	100,00%
	ABC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
RDP2	AT	99,55%	97,77%	100,00%	53,52%
	BT	100,00%	100,00%	100,00%	56,95%
	CT	100,00%	100,00%	100,00%	57,85%
	AB	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	BC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	AC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABT	100,00%	100,00%	100,00%	70,00%
	BCT	100,00%	100,00%	100,00%	90,00%
	ACT	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	ABC	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Na Figura 7.24 são ilustradas as coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas dos RDP3 e RDP4. Observa-se que independente dos parâmetros de falta, todas as coordenadas localizaram-se nos respectivos planos de falta e com as respectivas cores.

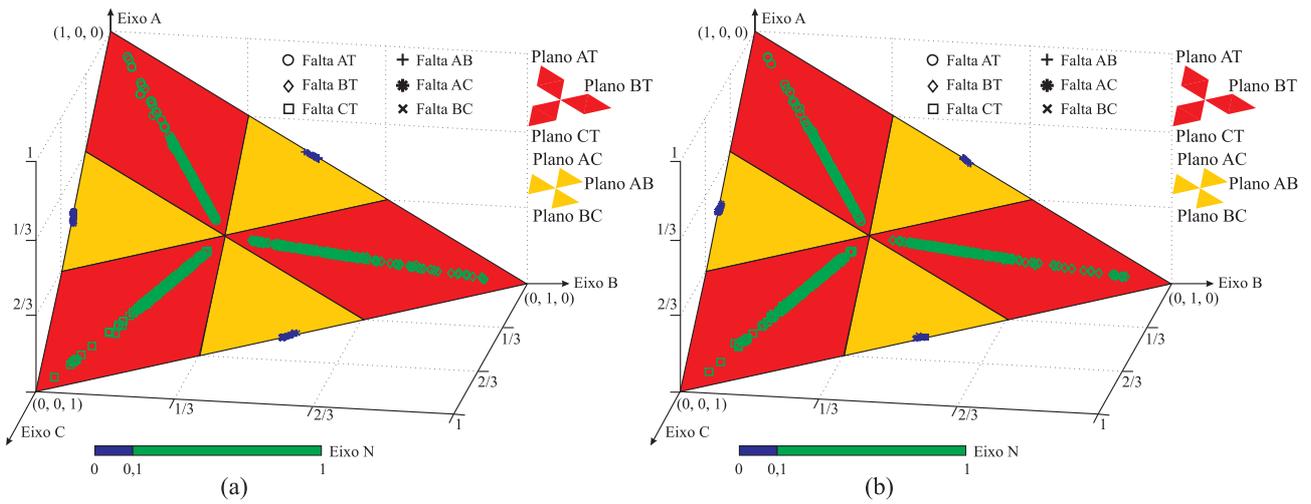


Figura 7.24. Coordenadas das faltas monofásicas e bifásicas do sistema elétrico de 500 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Na Figura 7.25 são ilustradas as coordenadas das faltas bifásicas para terra dos RDP1 e RDP2. Observam-se que todas as coordenadas *A*, *B* e *C* das faltas ABT, BCT e ACT localizaram-se nos planos AB, BC ou AC, respectivamente. Algumas coordenadas apresentaram cor azul, similar a uma falta bifásica, mas foram classificadas como faltas bifásicas para a terra durante avaliação em tempo real do valor da energia dos coeficientes de aproximação da corrente de neutro. Observam-se também que as coordenadas de duas faltas ACT do RDP1 localizaram-se no plano das faltas AT.

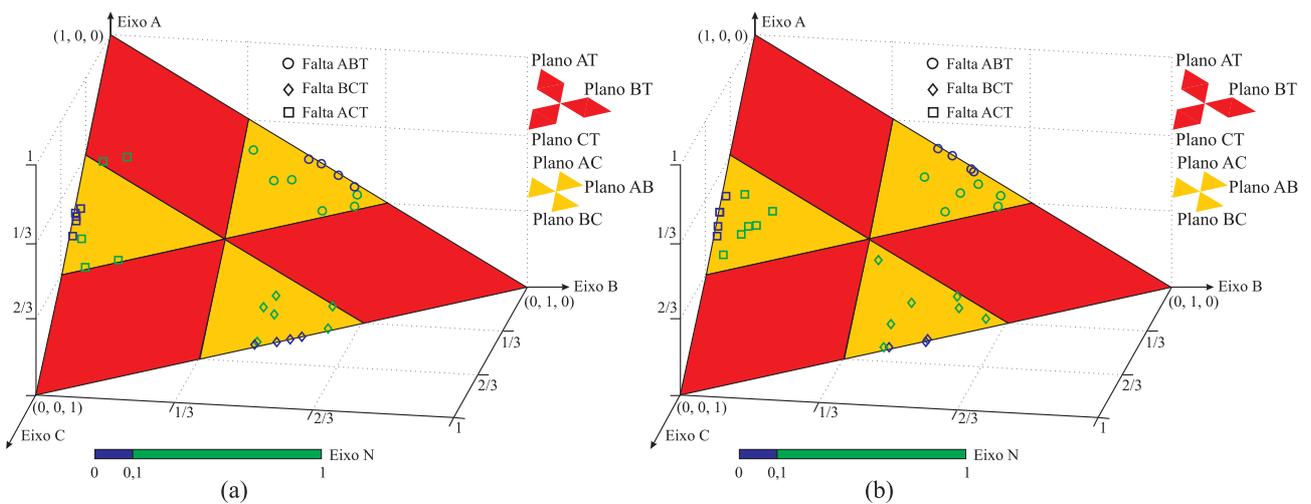


Figura 7.25. Coordenadas das faltas bifásicas para a terra do sistema elétrico de 500 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

Na Figura 7.26 são ilustradas as coordenadas das faltas trifásicas dos RDP3 e RDP4. Observam-se que as coordenadas A , B e C localizaram-se em torno de uma circunferência circunscrita ao triângulo de faltas. As coordenadas das faltas trifásicas localizadas nos planos das faltas bifásicas foram classificadas como faltas trifásicas após avaliação das energias dos coeficientes de aproximação das correntes de fase.

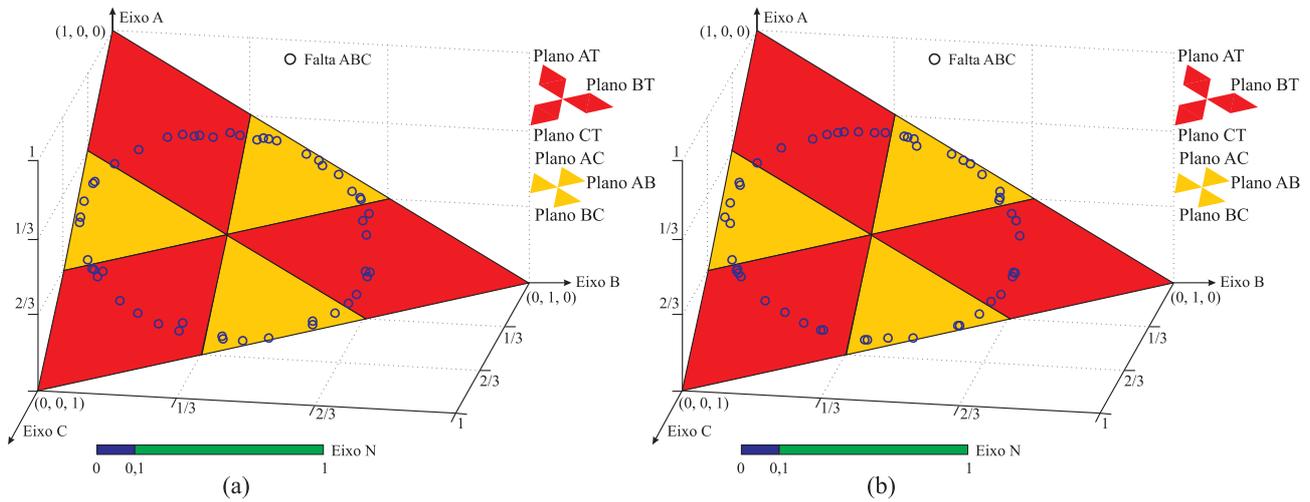


Figura 7.26. Coordenadas das faltas trifásicas do sistema elétrico de 500 kV: (a) RDP1; (b) RDP2.

7.3 AVALIAÇÃO DOS REGISTROS OSCILOGRÁFICOS REAIS

A versão *off-line* do método proposto foi avaliado com 2324 registros oscilográficos reais, obtidos em diversas partes do sistema de transmissão da Chesf, no período de 2003 a 2008, contemplando os níveis de tensão de 138, 230 e 500 kV, com taxa de amostragem de 1200 a 15360 amostras/s (Tabela 7.9).

Tabela 7.9. Nível de tensão e taxa de amostragem dos registros oscilográficos reais dos principais distúrbios.

Registro oscilográfico	Quantidade	Nível de tensão (%)			Frequência de amostragem (%)		
		138 kV	230 kV	500 kV	1200 Hz	15360 Hz	Outras
Sem distúrbios	1171	20,9	78,8	0,3	1,3	98,7	-
Falta	59	23,7	42,4	33,9	3,4	89,8	6,8
Afundamento de tensão	219	11,9	59,3	28,8	2,3	97,2	0,5
Transitórios de chaveamento	275	16,6	82,3	1,1	-	100,0	-
Energização de LT	252	17,9	71,7	10,4	11,9	88,1	-
Desligamento de LT	214	15,5	81,4	3,1	1,0	99,0	-
Energização de BC	35	-	100,0	-	-	100,0	-
Desligamento de BC	34	-	100,0	-	-	100,0	-

7.3.1 Registros Oscilográficos sem Distúrbios Transitórios

A grande quantidade de registros oscilográficos sem distúrbios transitórios na rede de oscilografia da Chesf vem causando problemas de caráter operacional, sobrecarregando a análise manual dos registros com distúrbios (SILVA *et al.*, 2007). O desempenho do método de diagnóstico de distúrbios transitórios foi avaliado com 1171 registros oscilográficos reais sem distúrbios transitórios, sem a detecção de nenhum evento. Portanto, a utilização do RDP com o método proposto não teria gerado esses registros oscilográficos.

7.3.2 Registros Oscilográficos com Falta

O desempenho do método de diagnóstico para registros oscilográficos reais com falta simples é apresentado na Tabela 7.10. De um total de 59 registros avaliados, independente do nível de tensão e taxa de amostragem, obteve-se uma taxa de acerto de 100% na detecção dos distúrbios transitórios e uma taxa de acerto de 98,31% na identificação dos distúrbios transitórios, visto que uma falta foi identificada como desligamento.

Tabela 7.10. Resultados obtidos com os registros oscilográficos reais com falta.

Taxa de acerto na detecção dos distúrbios	Taxa de acerto na identificação dos distúrbios	Taxa de acerto na classificação das faltas
100%	98,31%	96,55%

Na Figura 7.27 são ilustradas as tensões e correntes de fase do registro oscilográfico com falta AT, classificado como desligamento, destacando-se as correntes no instante inicial da falta. As energias \mathcal{E}_{v_A} , \mathcal{E}_{v_B} , \mathcal{E}_{v_C} , \mathcal{E}_{i_A} , \mathcal{E}_{i_B} e \mathcal{E}_{i_C} são ilustradas na Figura 7.28, em que apenas o PT relacionado ao instante final da falta, em k_2 , foi detectado. Neste caso, o distúrbio foi classificado como um desligamento, visto que os transitórios referentes ao instante inicial da falta, em k_1 , foram bastante amortecidos (Figura 7.27), não se tendo variações bruscas de energia neste instante (Figuras 7.28). A taxa de amostragem de apenas 5760 amostras/s também contribuiu para a não detecção dos transitórios de falta.

As formas de onda das tensões e correntes desta falta são típicas de uma falta de alta impedância (FAI) (JEERINGS; LINDERS, 1989), podendo ter sido causada, por exemplo, pelo contato do cabo condutor com uma árvore (ZIN; KARIM, 2007).

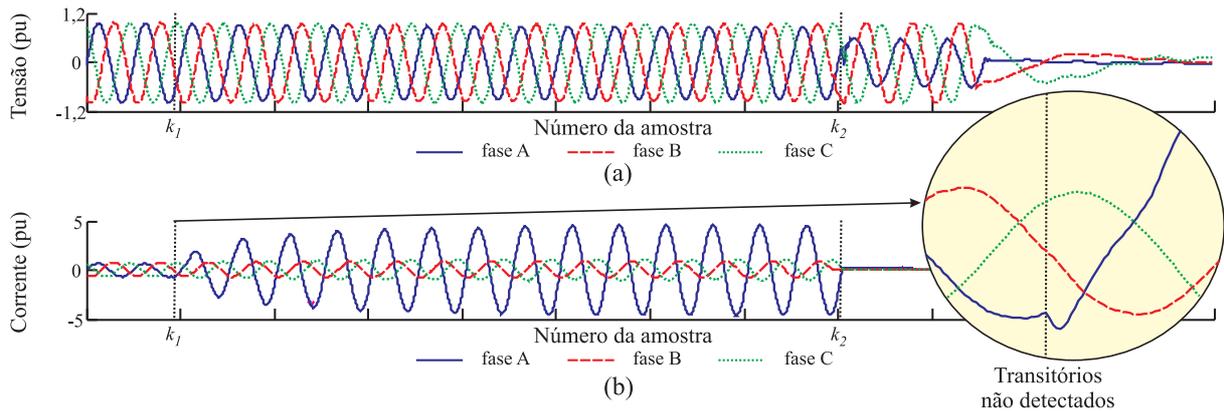


Figura 7.27. Registro real de uma falta AT: (a) tensões; (b) correntes. (Cortesia da Chesf)

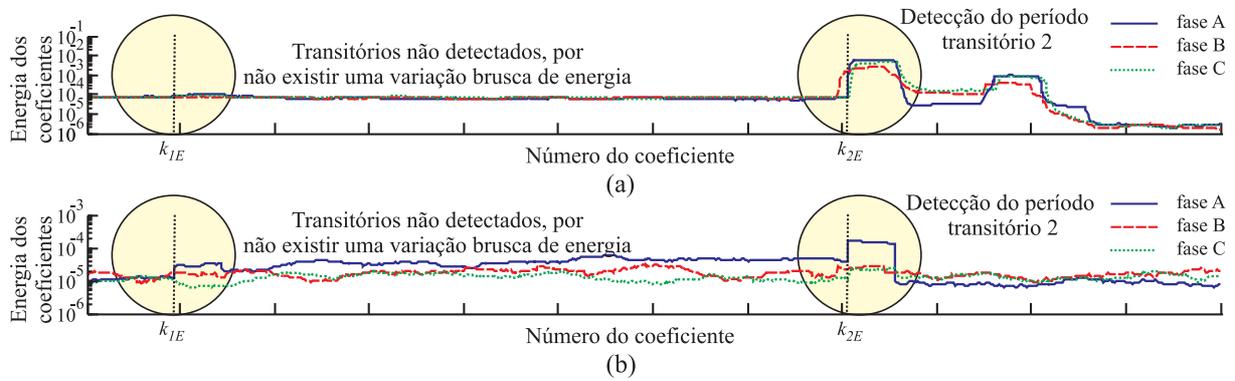
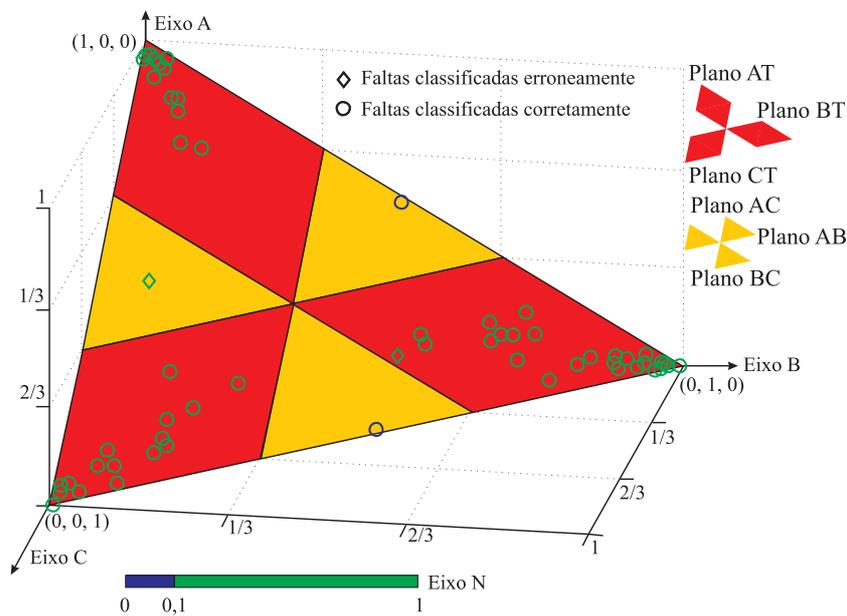


Figura 7.28. Energia dos coeficientes *wavelet* dos sinais da falta AT: (a) tensões; (b) correntes.

Os resultados obtidos na classificação de faltas são apresentados na Tabela 7.11. Observa-se que o método de classificação de faltas apresentou uma taxa de acerto de 96,55%, visto que apenas dois registros oscilográficos apresentaram classificação incorreta, enquanto que o método de classificação baseado nas sobrecorrentes não teve um desempenho satisfatório, pois muitas faltas monofásicas foram classificadas como bifásicas para terra. Na Figura 7.29 são ilustradas as coordenadas das faltas reais nos planos de falta, calculadas em meio ciclo após o instante inicial.

Tabela 7.11. Resultados obtidos com os métodos de classificação de falta.

Tipo de falta	Número de registros oscilográficos	Número de classificações corretas	
		Método das sobrecorrentes	Método (proposto)
Falta AT	13	2	13
Falta BT	25	17	25
Falta CT	16	5	16
Falta AB	1	1	1
Falta BC	1	1	1
Falta BCT	1	0	0
Falta ABC	1	1	0

**Figura 7.29.** Resultados da classificação de faltas em registros oscilográficos reais.

O método proposto também foi avaliado com 6 registros oscilográficos reais com falta evolutiva, em que se obteve uma taxa de acerto de 100% na detecção e classificação das faltas.

7.3.3 Registros Oscilográficos com Afundamentos de Tensão

O método de diagnóstico de distúrbios transitórios foi avaliado com 219 registros oscilográficos reais com afundamentos de tensão, no qual foi obtida uma taxa de acerto de 100% nas etapas de detecção e classificação de distúrbios (Tabela 7.12). O método convencional de detecção de afundamentos de tensão baseado no valor RMS das tensões (Apêndice D) também apresentou uma taxa de 100% na detecção dos distúrbios.

Tabela 7.12. Resultados obtidos com os registros oscilográficos reais com afundamentos de tensão.

Taxa de acerto na detecção de distúrbios	Etapa de classificação de distúrbios	
	Diagnóstico obtido	Taxa de acerto
100 %	Afundamento de tensão	100%

7.3.4 Registros Oscilográficos com Transitórios de Chaveamento

O desempenho do método proposto foi avaliado com 275 registros oscilográficos reais com transitórios de chaveamento, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.13. A etapa de detecção de distúrbios apresentou uma taxa de acerto de 98,54%, o que corresponde a quatro distúrbios não detectados. Dos 271 registros avaliados na etapa de classificação de distúrbios, todos foram classificados como transitórios de chaveamento.

Tabela 7.13. Resultados obtidos com os registros oscilográficos com transitórios de chaveamento.

Taxa de acerto na detecção de distúrbios	Taxa de acerto na classificação de distúrbios
98,54 %	100%

7.3.5 Registros Oscilográficos com Energização e Desligamentos de Linhas de Transmissão

O desempenho do método proposto foi avaliado com 252 registros oscilográficos reais, provenientes de manobras de energização de LTs, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.14. Resultados satisfatórios foram obtidos, visto que o método não detectou distúrbios em apenas quatro registros.

O desempenho do método de diagnóstico de distúrbios também foi avaliado com 214 registros oscilográficos reais, provenientes de manobras de desligamentos de LTs, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.15. O método não detectou distúrbios em apenas 9 registros.

Tabela 7.14. Resultados obtidos com os registros oscilográficos com energizações de LT.

Registro oscilográfico	Quantidade	Método proposto	
		Diagnóstico	Quantidade
Energização de uma LT com o terminal remoto em aberto e monitoramento no terminal local	166	Energização Sem distúrbios	165 1
Energização de uma LT com o terminal remoto em aberto e monitoramento no terminal remoto	34	Transitórios de chaveamento	34
Energização de uma LT com o terminal remoto fechado e monitoramento no terminal local	27	Energização Sem distúrbios	25 2
Energização de uma LT com o terminal remoto fechado e monitoramento no terminal remoto	25	Transitórios de chaveamento Sem distúrbios	24 1

Tabela 7.15. Resultados obtidos com os registros oscilográficos com desligamentos de LT.

Registro oscilográfico	Quantidade	Método proposto	
		Diagnóstico	Quantidade
Desligamento de uma LT com o terminal remoto fechado e monitoramento no terminal local	28	Desligamento Sem distúrbios	25 3
Desligamento de uma LT com o terminal remoto fechado e monitoramento no terminal remoto	1	Transitórios de chaveamento	1
Desligamento de uma LT com o terminal remoto aberto e monitoramento no terminal local	158	Desligamento Sem distúrbios	152 6
Desligamento de uma LT com o terminal remoto aberto e monitoramento no terminal remoto	27	Transitórios de chaveamento	27

7.3.6 Registros Oscilográficos com Energização e Desligamento de Banco de Capacitores

O desempenho do método de diagnóstico foi avaliado com 69 registros oscilográficos reais com energização e desligamento de bancos de capacitores, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.16. O método de diagnóstico de distúrbios apresentou uma taxa de acerto de 100% nas etapas de detecção e classificação de distúrbios.

Tabela 7.16. Resultados obtidos com os registros oscilográficos com energizações e desligamentos de banco de capacitores.

Tipo de distúrbio	Detecção de distúrbios		Classificação de distúrbios	
	Reg. avaliados	Dist. detectados	Diagnóstico obtido	Quantidade
Energização de BC	35	35	Energização	35
Desligamento de BC	34	34	Desligamento	34

7.3.7 Registros Oscilográficos com Múltiplos Distúrbios

Na Tabela 7.17 é apresentado o desempenho do método de diagnóstico de distúrbio para registros oscilográficos com múltiplos distúrbios, sendo obtida uma taxa de acerto de 100 % na detecção e classificação dos múltiplos distúrbios. Além disto, todas as faltas foram classificadas corretamente.

Tabela 7.17. Resultados obtidos com os registros oscilográficos com múltiplos distúrbios.

Tipo de distúrbio	Quantidade	Diagnóstico obtido	Quantidade
Duplo afundamento de tensão	20	Duplo afundamento de tensão	20
Afundamento de tensão + variação de carga	22	Afundamento de tensão + transitórios de chaveamento	22
Dupla energização	1	Energização + trans. de chaveamento	1
Falta + Religamento automático	5	Falta + Energização	5
Falta + Tentativa de religamento	1	Falta + Tentativa de religamento	1
Religamento + Falta	1	Energização + Falta	1
Tentativa de religamento	9	Tentativa de religamento	9

7.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a análise dos resultados do método de diagnóstico de distúrbios transitórios em simulações em tempo real e em dados reais provenientes do sistema Chesf, resumida a seguir:

1. Base de dados 1: simulação de 1000 faltas em uma LT de circuito duplo de um sistema elétrico de 230 kV. Conforme a posição dos RDPs, o método foi avaliado, em tempo real, com 2000 faltas e 2000 afundamentos de tensão, apresentando:
 - (a) Faltas: taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios; taxa de acerto de 98,90% na classificação dos distúrbios (1978 faltas e 22 desligamentos); tempo médio de detecção dos transitórios de falta equivalente a duas amostras; taxa de acerto de 99,95% na classificação de faltas (uma classificação errada).
 - (b) Afundamentos de tensão: taxa de acerto de 100% na detecção e classificação de distúrbios transitórios.

2. Base de dados 2: simulação de 1000 faltas em uma LT de um sistema elétrico de 230 kV. Conforme a posição dos RDPs, o método foi avaliado, em tempo real, com 2000 faltas e 2000 afundamentos de tensão, apresentando:
 - (a) Faltas: taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios; taxa de acerto de 98,85% na classificação dos distúrbios (1977 faltas e 23 desligamentos); tempo médio de detecção dos transitórios de falta equivalente a duas amostras; taxa de acerto de 100% na classificação de faltas.
 - (b) Afundamentos de tensão: taxa de acerto de 100% na detecção e classificação de distúrbios transitórios.

3. Base de dados 3: simulação de 1000 faltas evolutivas em uma LT de circuito duplo de um sistema elétrico de 230 kV. Conforme a posição dos RDPs, o método foi avaliado, em tempo real, com 2000 faltas evolutivas e 2000 afundamentos de tensão, apresentando:
 - (a) Faltas evolutivas: taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios; taxa de acerto de 100% na classificação dos distúrbios (2000 faltas, sendo 10 faltas simples e 990 faltas evolutivas); tempo médio de detecção dos transitórios de falta equivalente a duas amostras; taxa de acerto de 100% na classificação da primeira etapa das faltas; taxa de acerto de 100% na classificação da segunda etapa das faltas.
 - (b) Afundamentos de tensão: taxa de acerto de 100% na detecção e classificação de distúrbios transitórios.

4. Base de dados 4: simulação de múltiplos distúrbios (1000 faltas seguidas pelo religamento automático dos dois terminais de uma LT) no sistema elétrico de 500 kV. Conforme a posição dos RDPs, o método foi avaliado, em tempo real, com 2000 faltas, 2000 energizações de LTs e 1000 transitórios de chaveamento, apresentando:
 - (a) Falta: taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios; taxa de acerto de 99,85% na classificação dos distúrbios (1997 faltas e 3 desligamentos); tempo médio de detecção dos transitórios de falta equivalente a duas amostras; taxa de acerto de 99,80% na classificação de faltas (duas classificações erradas).

- (b) Energizações: taxa de acerto de 100% na detecção e classificação de distúrbios transitórios.
 - (c) Transitórios de chaveamento: taxa de acerto de 100% na detecção e classificação de distúrbios transitórios.
5. Registros oscilográficos reais: A versão *off-line* do método foi avaliada com 2324 registros reais da Chesf, no qual se têm faltas, faltas evolutivas, afundamentos de tensão, transitórios de chaveamentos, energizações e desligamentos de LTs, energizações e desligamentos de bancos de capacitores e múltiplos distúrbios transitórios, apresentando:
- (a) Uma taxa de acerto de 99,35% na detecção de distúrbios transitórios; taxa de acerto de 99,96% na classificação dos distúrbios (uma falta classificada como desligamento); taxa de acerto de 97,50% na classificação de faltas.

Nas 4000 simulações em tempo real realizadas no RTDSTM, o método foi avaliado 17000 vezes e foram gerados 14000 registros oscilográficos com distúrbios ou múltiplos distúrbios (taxa de acerto de 100% na formação de registros oscilográficos com distúrbios transitórios).

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE CONTINUAÇÃO

Um método de diagnóstico de distúrbios transitórios em sistemas elétricos de potência foi apresentado. O método é baseado na análise, em tempo real, da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes, com as seguintes funcionalidades: detecção e classificação de distúrbios transitórios, tais como faltas, afundamentos de tensão e transitórios devidos às manobras de chaveamento; detecção e classificação de múltiplos distúrbios com transitórios, tais como faltas seguidas por religamentos automáticos; localização dos instantes de início e fim dos distúrbios; classificação das faltas simples e das faltas evolutivas.

O método de diagnóstico de distúrbios foi utilizado em um RDP, implementado no RTDSTM, de maneira que apenas registros oscilográficos com distúrbios transitórios fossem gerados nas simulações em tempo real, com o respectivo diagnóstico contido nos canais digitais. Uma versão *off-line* do método também foi avaliada com registros oscilográficos reais provenientes do sistema de transmissão da Chesf.

Com relação às simulações em tempo real, o método foi avaliado com um modelo de sistema elétrico de 230 kV proposto pelo IEEE e com um modelo baseado em dados reais do sistema elétrico de potência de 500 kV da Chesf. Além da topologia do sistema, o método foi avaliado com vários distúrbios (faltas, faltas evolutivas, afundamentos de tensão, energizações de LTs e transitórios de chaveamento) e com taxas de amostragem de 20000 e 15360 amostras/s. Com relação às faltas, o ângulo de incidência, a resistência e a distância tiveram valores aleatórios. Vários RDPs distribuídos ao longo dos sistemas elétricos foram utilizados em todas as 4000 simulações de distúrbios transitórios realizadas no RTDSTM. Ao total, o método foi avaliado 17000 vezes, apresentando o seguinte desempenho:

- Faltas: taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios em 6000 faltas; taxa de acerto de 99,20% na identificação das faltas (5952 faltas e 48 desligamentos de LTs); tempo médio de detecção dos transitórios de falta equivalente a duas amostras; taxa de acerto de 99,95% na classificação das faltas (3 erros).

- Faltas evolutivas: taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios em 2000 faltas evolutivas; taxa de acerto de 100% na identificação das faltas (990 faltas evolutivas e 10 faltas simples); tempo médio de detecção dos transitórios de falta equivalente a duas amostras; taxa de acerto de 100% na classificação da primeira etapa das faltas; taxa de acerto de 100% na classificação da segunda etapa das faltas.
- Afundamentos de tensão: taxa de acerto de 100% na detecção de distúrbios transitórios em 6000 afundamentos de tensão.
- Energizações de LTs: taxa de acerto de 100% na detecção e identificação de distúrbios transitórios em 2000 energizações de LTs.
- Transitórios de chaveamento: taxa de acerto de 100% na detecção e identificação de distúrbios transitórios em 1000 transitórios de chaveamento.

De um total de 17000 avaliações, em tempo real, o método proposto apresentou uma taxa de acerto de 100% na detecção dos distúrbios, no qual foram gerados 14000 registros oscilográficos. Dentre os distúrbios ocorridos, dados oscilográficos de 1000 faltas+energizações+transitórios de chaveamento e 1000 faltas+energizações foram armazenados em 2000 registros (registros com múltiplos distúrbios), respectivamente.

Com relação ao dados reais, a versão *off-line* do método de diagnóstico de distúrbios foi avaliada com 2324 registros reais da Chesf, provenientes de subsistemas de 138, 230 e 500 kV e com diversas taxas de amostragem, no qual se têm faltas, faltas evolutivas, afundamentos de tensão, transitórios de chaveamentos, energizações e desligamentos de LTs, energizações e desligamentos de bancos de capacitores e múltiplos distúrbios transitórios, apresentando o seguinte desempenho:

- Taxa de acerto de 99,35% na detecção de distúrbios transitórios (17 distúrbios não detectados).
- Taxa de acerto de 99,96% na classificação dos distúrbios (uma falta classificada como desligamento).
- Taxa de acerto de 97,50% na classificação de faltas. Um total de 6 faltas evolutivas detectadas e classificadas corretamente.

- Taxa de acerto de 100% na detecção e classificação de múltiplos distúrbios transitórios.

Com os resultados obtidos, conclui-se que a energia dos coeficientes *wavelet* (referente à energia dos transitórios) é uma ferramenta adequada à análise dos distúrbios com transitórios em sistemas de potência. As principais contribuições da metodologia proposta são descritas a seguir:

- Generalização em relação à topologia do sistema, no qual foi aplicado à análise de distúrbios em sistemas de 138, 230 e 500 kV, com linhas de circuito simples e duplo e em sinais de diversas taxas de amostragem.
- Generalização em relação ao tipo de distúrbio transitório, no qual foi aplicado à análise de faltas, faltas evolutivas, afundamentos de tensão, energizações e desligamentos de linhas de transmissão, energizações e desligamentos de bancos de capacitores e transitórios de chaveamento.
- Generalização em relação ao tipo de diagnóstico, no qual foi aplicado à detecção de distúrbios, identificação de distúrbios, identificação dos instantes de início e fim dos distúrbios e classificação de faltas. Podendo ser ainda aplicado à localização de faltas.
- Generalização em relação à classificação de faltas, no qual foram avaliados o tipo, a resistência, o ângulo de incidência e o local de falta nas simulações.
- Utilização em aplicações em tempo real e *off-line*.

A transformada *wavelet* discreta e a transformada *wavelet* discreta redundante foram comparadas e constatou-se que, em aplicações em tempo real, a transformada *wavelet* discreta redundante apresenta vantagens no que concerne à detecção mais rápida dos transitórios, visto que ela não realiza o processo de subamostragem.

Um estudo da influência do ângulo de incidência e da resistência de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes nos diversos tipos de falta foi realizado, no qual foi verificado que essas energias variam senoidalmente com o ângulo de incidência da falta e apresentam um decaimento exponencial com a resistência de falta. Apesar do bom desempenho obtido nas etapas de detecção e classificação de faltas, existe um ângulo de incidência

em que os transitórios são nulos nas faltas monofásicas e bifásicas, que resultou nos erros de detecção de faltas simuladas. Por outro lado, apesar do decaimento exponencial das energias com a resistência de falta, este parâmetro não influenciou negativamente nos resultados obtidos, enquanto que este é a principal limitação dos métodos baseados nas sobrecorrentes de falta.

Como contribuição adicional, ressalta-se que o método proposto apresenta a vantagem de detectar e classificar as faltas em tempo real, em média a partir da segunda amostra após ocorrência dos transitórios no ponto monitorado, o que é crucial para o bom desempenho dos relés de proteção. Como continuação dos estudos realizados para a elaboração desta tese, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Identificação de faltas internas ou externas às linhas de transmissão. Isto pode ser feito, por exemplo, comparando os instantes de detecção dos transitórios de falta em ambos os terminais da linha, levando em consideração o tempo de propagação das ondas viajantes. A comparação do sinal da amplitude dos coeficientes *wavelet* em ambos os terminais também pode ser utilizada para testar a direção de propagação das ondas viajantes.
- A equação da energia dos coeficientes *wavelet* em função do ângulo de incidência, com a estimativa do ângulo de incidência de falta obtida na detecção do instante inicial da falta, em conjunto com uma análise pormenorizada do efeito da distância de falta nas energias dos coeficientes *wavelet* podem ser usadas para implementação do módulo de localização de faltas em linhas de transmissão.

O método proposto nesta tese em conjunto com um módulo de localização de faltas, também baseado na análise das energias dos coeficientes *wavelet*, podem ser utilizados em aplicações em tempo real em relés digitais de proteção de linhas de transmissão.

REGISTRADORES DIGITAIS DE PERTURBAÇÕES

Os RDPs são dispositivos que monitoram, constantemente, grandezas elétricas em LTs e em equipamentos elétricos, tais como transformadores de potência, banco de capacitores e compensadores estáticos, armazenando informações em registros oscilográficos na ocorrência de distúrbios e em manobras de chaveamento. A utilização destes equipamentos é de extrema importância para os sistemas elétricos, visto que a análise dos registros oscilográficos é imprescindível para o diagnóstico de faltas (confirmação da ocorrência, classificação, identificação da duração e localização) e avaliação do desempenho e correção dos sistemas de proteção (PRICE; WARREN, 2003; PATTERSON, 2005; ZIN; KARIM, 2007). Desta forma, medidas mitigadoras podem ser tomadas, resultando em melhorias contínuas do desempenho do sistema elétrico e na qualidade dos serviços públicos de energia elétrica.

A utilização desse tipo de dispositivo requer algumas considerações, como por exemplo: tipo de distúrbio a ser monitorado; grandezas analógicas e digitais a serem monitoradas; taxa de amostragem; tamanho dos registros; modo de captura dos eventos e limitações e erros dos instrumentos de medição (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006).

Com o avanço da tecnologia, diversos tipos de dispositivos de monitoração vêm sendo desenvolvidos. Os dispositivos denominados RDPs monitoram tensões e correntes com amostragem de 64 a 356 pontos por ciclo, por períodos de 1 a 2 segundos, sendo apropriados à captura de dados oscilográficos durante a ocorrência de faltas e de distúrbios transitórios. Além dos RDPs, alguns relés de proteção possuem oscilografia. Porém, a amostragem típica de 2 a 20 pontos por ciclo, limita o uso desses equipamentos para análise de faltas e distúrbios transitórios, nos casos em que se deseja avaliar os fenômenos transitórios. Além dos RDPs, voltados à análise de faltas, existem outros dispositivos para o monitoramento de harmônicas, estado de regime permanente do sistema, entre outros (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006).

Os RDPs comerciais são constituídos por entradas analógicas e digitais. As entradas analógicas monitoram os sinais de tensão e corrente. O armazenamento destas informações constituem os canais analógicos dos registros oscilográficos, sendo úteis para identificação do tipo, duração e localização das faltas. As entradas digitais informam o estado lógico dos contatos dos disjuntores e as sequências de atuação dos relés de proteção. O armazenamento dessas informações constituem os canais digitais do registro, sendo úteis para avaliação do desempenho e correção dos sistemas de proteção (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006). Ao final, as informações coletadas pelos RDPs são organizadas em registros oscilográficos padronizados no formato COMTRADE (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1991).

Na prática, as medidas analógicas (tensões e correntes) dos RDPs comerciais não são obtidas diretamente do sistema elétrico de potência, mas do secundário dos TPCs e TCs, respectivamente (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006). Esse fato provoca alguns problemas no desempenho dos RDPs, pois os TPCs e TCs possuem limitações quanto à resposta em frequência e apresentam problemas de saturação.

Outro fator importante no que diz respeito aos RDPs está relacionado à taxa de amostragem do conversor analógico-digital (A/D), a qual afeta o desempenho dos filtros analógicos e digitais, além de interferir diretamente na precisão das análises dos registros oscilográficos. De modo geral, os RDPs possuem taxas de amostragem de 64 a 356 amostras/ciclo (3840 a 21360 amostras/s) (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006).

Na prática, a frequência de amostragem (f_s) do conversor A/D do RDP delimita a largura de banda do sinal amostrado em DC a $f_s/2$. No entanto, a amostragem de um sinal com componentes de frequência acima da frequência de Nyquist ($f_s/2$) provoca o surgimento do fenômeno *aliasing*, em que as frequências acima de $f_s/2$ são projetadas para as baixas frequências, ocasionando erros na aquisição do sinal original. Neste sentido, os dispositivos de monitoramento devem incluir um filtro *anti-aliasing* para eliminar as frequências maiores que a de Nyquist. Uma prática comum é a utilização de filtros passa-baixas, com frequência de corte menor ou igual a $f_s/2$.

A captura dos distúrbios pelos RDPs comerciais é realizada por gatilhamentos ou disparos, do inglês *triggering*, devido às mudanças nos sinais das entradas analógicas, nos sinais derivados dos sinais analógicos, na operação dos sistemas de proteção, entre outros. Com relação ao gatilhamento analógico, o disparo para captura dos distúrbios é normalmente realizado, quando a amplitude das tensões e correntes excede ou decresce determinado limiar (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006).

Os RDPs comerciais são configurados para armazenar em dados oscilográficos no intervalo de 1 a 2 segundos. Na prática, o tamanho dos registros pode ser otimizado, de modo que apenas as amostras relacionadas aos distúrbios e a alguns ciclos pré- e pós-distúrbio sejam armazenadas. Os distúrbios com duração acima da capacidade máxima de armazenamento permitida podem ser gravados em dois registros distintos (IEEE Power System Relaying Committee Report, 2006).

FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL

Tradicionalmente, as simulações de transitórios eletromagnéticos são realizadas por programas que utilizam a regra de integração trapezoidal para converter equações integrais resultantes de análises nodais do sistema elétrico em equações algébricas, dentre os quais destaca-se o ATP (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

A utilização da regra trapezoidal requer que a resolução das equações, que representam o modelo do sistema de potência, seja feita em instantes de tempo discretos (passo de tempo), em vez de uma solução contínua. A solução de um único passo de tempo em modelos de sistemas complexos pode ser obtida em vários segundos em um computador usual. Nestes casos, a simulação não é realizada em tempo real. Porém, caso um computador seja capaz de executar os cálculos necessários para um único passo de tempo, em um período inferior às constantes de tempo do sistema, então a operação em tempo real pode ser alcançada (KUFFEL *et al.*, 1995).

Antigamente, as simulações dos sistemas elétricos de potência eram feitas por meios analógicos, via modelos de sistemas elétricos em miniatura, conhecidos como Analisadores de Rede ou *Transient Network Analyzers* (TNA) (DOI *et al.*, 1990). Com o avanço da tecnologia e o advento de dispositivos cada vez mais eficazes para o processamento digital de sinais, a implementação de algoritmos para solução digital de transitórios eletromagnéticos em tempo real tornou-se viável e diversos simuladores digitais em tempo real vêm sendo desenvolvidos, a exemplo do RTDSTM (MCLAREN *et al.*, 1992).

O RTDSTM é uma combinação de *hardware* e *software*, constituído para alcançar o tempo real em uma simulação e se caracteriza como uma poderosa ferramenta com capacidade de modelar o sistema elétrico de potência de forma realista, propiciando flexibilidade e confiabilidade às simulações digitais. Além do mais, o RTDSTM possui uma interface de entrada e saída de dados que torna possível a comunicação do sistema simulado com equipamentos reais, tais como relés de proteção, equipamentos de monitoramento e sistemas de controle, permitindo o comis-

sionamento e a verificação do desempenho de tais equipamentos (DICK *et al.*, 1996). Por fim, o RTDSTM permite ao usuário implementar e incorporar seus próprios modelos e algoritmos às simulações digitais em tempo real, viabilizando o desenvolvimento de modelos de componentes do sistema elétrico, assim como o desenvolvimento de algoritmos para dispositivos de controle e proteção (GIESBRECHT *et al.*, 1998; OUELLETTE *et al.*, 2004; OUELLETTE *et al.*, 2006).

A seguir, tem-se uma descrição sucinta dos *hardwares* e *softwares* do RTDSTM.

B.1 HARDWARE DO RTDSTM

O RTDSTM foi o primeiro simulador digital em tempo real de sistemas de potência, com capacidade de realizar testes com equipamentos externos, a exemplo de relés de proteção. Seu *hardware* é baseado na utilização de *Digital Signal Processors* (DSP) com uma arquitetura de processamento em paralelo, desenvolvido especificamente para solução de transitórios eletromagnéticos baseada em algoritmos implementados em programas do tipo EMTP (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

O RTDSTM é composto por estruturas modulares denominadas *racks* que simulam sistemas elétricos com um número limitado de barras e equipamentos. A simulação de sistemas elétricos mais complexos pode ser realizada com a utilização de vários *racks* funcionando em conjunto, de forma que o sistema elétrico inteiro é dividido em subsistemas processados por *rack* distintos. A troca de informações entre os subsistemas é realizada por meio do cartão IRC (*Inter-Rack Communication*) ou do cartão de comunicação *intra-racks*.

Cada *rack* do RTDSTM contém um cartão WIF (*Workstation InterFace*), cartão de interface de trabalho, que sincroniza as simulações e coordena a comunicação entre os cartões de processamento, bem como a comunicação entre os *racks*. O cartão WIF é responsável por assegurar a simulação em tempo real, cujo passo de tempo é de 50 μ s.

As interfaces para entrada e saída de dados do sistema elétrico simulado foram desenvolvidas no RTDSTM para possibilitar a realização de testes com dispositivos de controle e proteção. Para este fim, o simulador possui uma família de cartões denominada GT-I/O (*Gigabit Transceiver-Input/Output*). Estes cartões são conectados ao GPC por meio de *links* de fibra ótica de 2 GHz e fornecem isolamento ótica com relação ao simulador. A família GT-I/O é composta pelos seguintes componentes:

1. Cartão GTAO (*Gigabit Transceiver Analogue Output Card*): cartão usado para gerar sinais analógicos com valores de pico entre ± 10 V, por meio de 12 canais de saída de 16 bits. O GTAO realiza um processo de *oversampling* e a saída é fornecida a cada $1 \mu\text{s}$.
2. Cartão GTAI (*Gigabit Transceiver Analogue Input Card*): cartão usado para entrada de sinais analógicos externos ao RTDSTM. O GTAI possui dois canais conversores de sinais analógicos para digitais de 16 bits com seis entradas cada. Estes canais são configurados como entradas diferenciais de ± 10 V de pico.
3. Cartão GTDO (*Gigabit Transceiver Digital Output Card*): cartão usado para gerar sinais digitais de 7 a 24 V por 64 canais digitais de saída, o que propicia a comunicação com equipamentos externos.
4. Cartão GTDI (*Gigabit Transceiver Digital Input Card*): cartão usado como interface de entrada para sinais digitais (0-5 V) provenientes de equipamentos externos ao RTDSTM. O GTDI possui 64 canais de entrada digital.
5. Cartão GTFPI (*Gigabit Transceiver Front Painel Interface Card*): cartão usado para interface de entrada ou saída de sinais a partir do painel frontal do RTDSTM. O GTFPI pode ser utilizado com o painel frontal de entrada e saída digital e também com o painel de alta tensão.
6. Cartão GTNET (*Gigabit Transceiver Network Interface System Card*): cartão usado para interface de protocolos de rede com o RTDSTM, a exemplo do protocolo IEC 61850. Este cartão ainda é composto pelo GTNET-*playback* que permite que registros oscilográficos armazenados remotamente em um computador possam ser carregados e reproduzidos pelo RTDSTM, possibilitando assim a análise de possíveis causas de falhas de operação do sistema de proteção quando da ocorrência do distúrbio.

B.2 SOFTWARE DO RTDSTM

Diferentes níveis de *software* compõem o RTDSTM. No nível mais baixo está o compilador, o qual gera os códigos de simulação requeridos pelo RTDSTM e os modelos dos componentes de sistemas elétricos (linhas de transmissão, transformadores, geradores, etc.), os quais são baseados nos algoritmos e equações encontradas em programas do tipo EMTP, porém otimizadas.

dos para simulação em tempo real. No nível mais alto, encontra-se a GUI (*Graphical User Interface*), denominada RSCAD.

A interação entre o usuário e o RTDSTM é realizada por meio do RSCAD, que permite a construção e a elaboração de circuitos e componentes do sistema, bem como a visualização e armazenamento dos resultados das simulações. O RSCAD é composto por um conjunto de módulos individuais, cujos mais importantes são descritos a seguir.

B.2.1 Módulo *Component Builder (CBuilder)*

O módulo *CBuilder* constitui-se em um ambiente de criação de novos componentes de controle e de novos componentes do sistema elétrico mediante a implementação, por meio da linguagem de programação C, de modelos e algoritmos desenvolvidos pelo usuário. Os componentes criados neste módulo podem ser incorporados às simulações em tempo real, interagindo com os componentes já existentes no RTDSTM.

Na Figura B.1 é ilustrado o módulo *CBuilder* durante a criação do componente responsável pela detecção de distúrbios transitórios e classificação de faltas proposto na tese. Na interface da esquerda, tem-se a estrutura física do componente, com as respectivas entradas e saídas. Na interface da direita, tem-se a parte de configuração do componente, no qual é possível definir as variáveis de entrada e saída e, o mais importante, fazer a programação do componente em linguagem C.

B.2.2 Módulo *Draft*

O módulo *draft* (Figura B.2) possibilita a modelagem do sistema elétrico a ser simulado, sendo composto por duas interfaces:

1. Interface de modelagem do circuito elétrico (interface esquerda): os componentes do sistema são interligados e editados. Em seguida, o sistema é compilado para que sejam gerados os códigos de simulação requeridos pelo RTDSTM (*hardware*).
2. Interface com os componentes do circuito (interface direita): abriga os componentes individuais do sistema de potência (transformadores, linhas, etc.), os blocos de controle, assim como os componentes criados no módulo *CBuilder*.

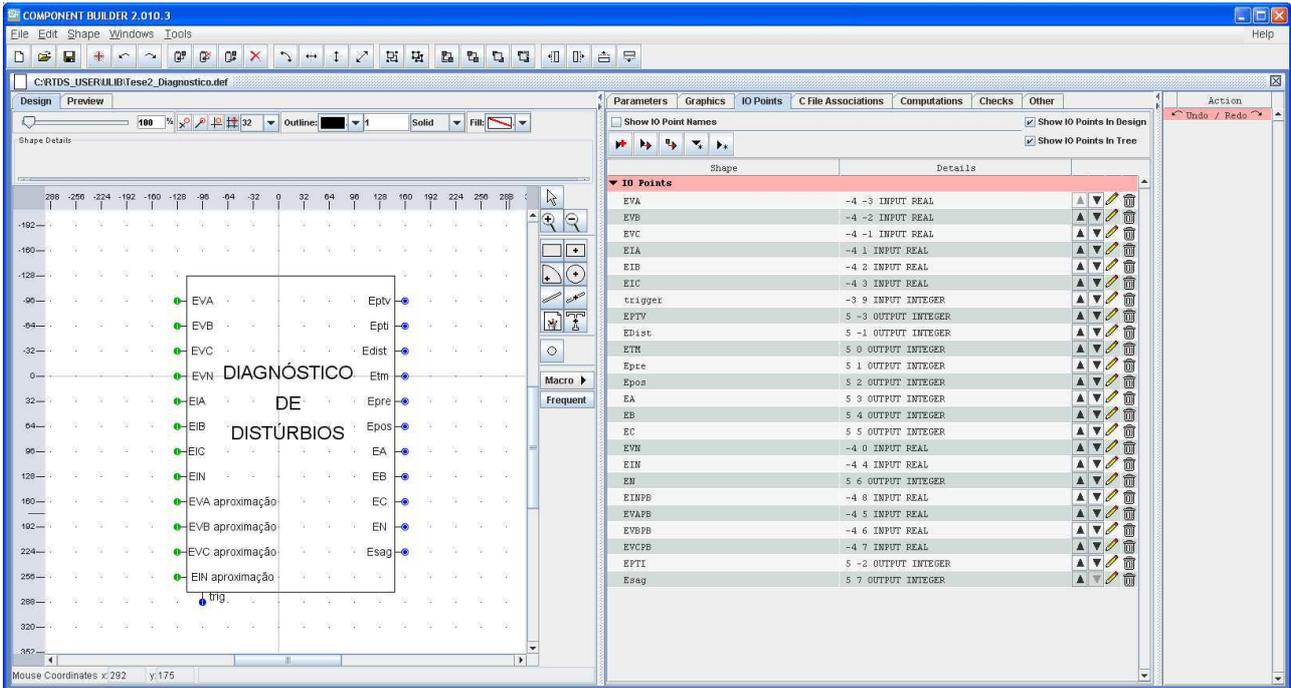


Figura B.1. Interface do módulo CBuilder.

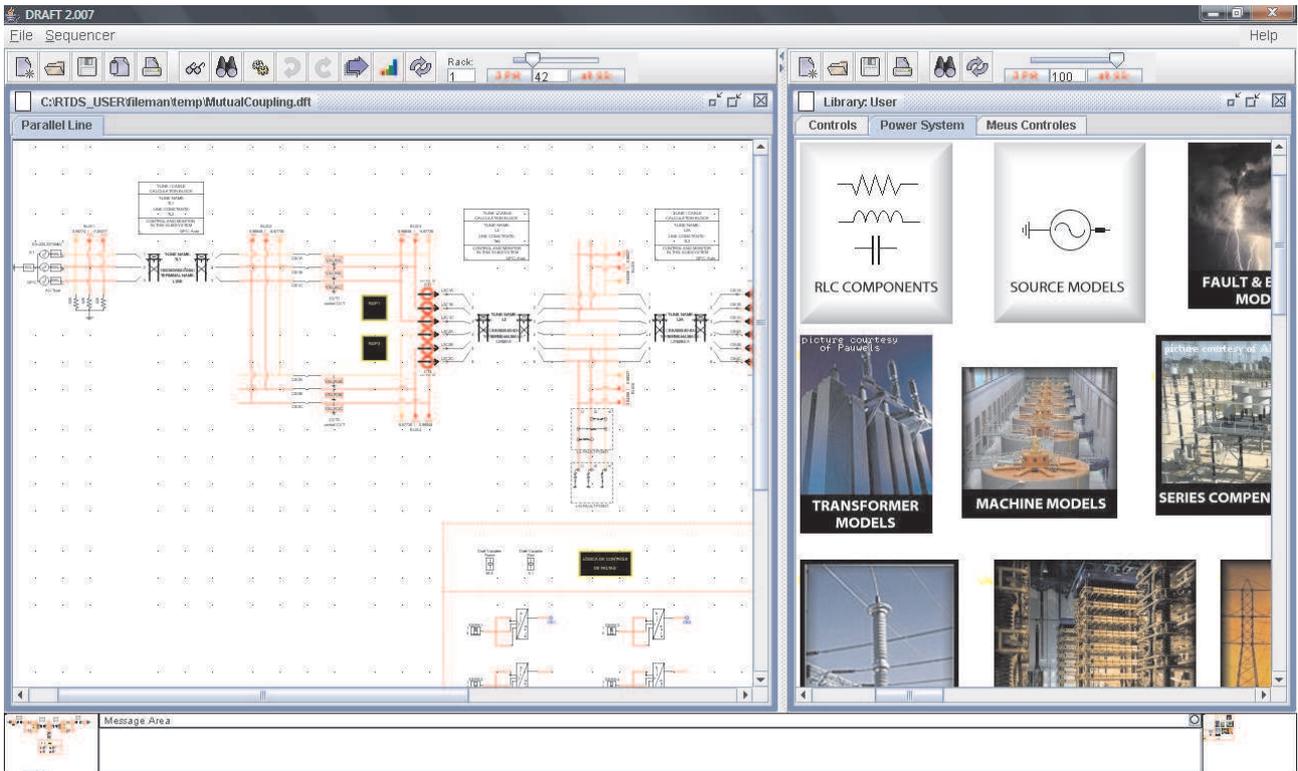


Figura B.2. Interface do módulo Draft.

B.2.3 Módulo *Runtime*

O módulo *runtime* controla a simulação em tempo real do RTDSTM. Com o sucesso da compilação do modelo do sistema elétrico no módulo *draft*, pode-se inicializar a simulação em tempo real. Esse módulo permite, ainda, uma interação dinâmica com a simulação por meio de botões de comando, no qual uma falta, por exemplo, pode ser aplicada em um ponto pré-definido apenas com um comando em um botão. As grandezas do sistema elétrico, tais como tensão, corrente e potência podem ser apresentadas graficamente no *runtime*, desde que tenham sido definidas no *draft*.

Na Figura B.3 é ilustrado o módulo *runtime* referente a um sistema elétrico composto por uma linha de transmissão, modelado no módulo *draft*, em que se pode aplicar uma falta ao longo de sua extensão. Os parâmetros de falta (tipo, resistência, ângulo de incidência e distância de falta) também foram definidos no módulo *draft*. Porém, eles podem ser modificados manualmente no módulo *runtime*, como ilustrado na Figura B.3, em que a falta foi configurada para uma falta AT, com resistência de 10 Ω, ângulo de incidência de 90° e distância de 50% (metade da LT). Quando a falta foi aplicada, por meio de um botão com esta finalidade, alguns sinais específicos do sistema elétrico do módulo *draft* foram designados para serem apresentados em um gráfico.



Figura B.3. Interface do módulo *Runtime*.

MÉTODO DA SOBRECORRENTE PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

Muitos algoritmos de detecção e classificação de faltas convencionais são baseados na sobrecorrente de falta, se resumindo à comparação dos fasores das correntes de regime permanente e de falta. A seguir, apresenta-se uma síntese de tais algoritmos (ADU, 2002):

1. Se $\Delta I_a > 0$, $\Delta I_b < 0$, $\Delta I_c < 0$ e $|I_r| > 0$, então a falta é monofásica na fase A (de forma análoga para faltas monofásicas nas fases B e C).
2. Se $\Delta I_a > 0$, $\Delta I_b > 0$, $\Delta I_c < 0$ e $|I_r| = 0$, então a falta é bifásica entre as fases A e B (de forma análoga para faltas bifásicas do tipo AC e BC).
3. Se $\Delta I_a > 0$, $\Delta I_b > 0$, $\Delta I_c < 0$ e $|I_r| > 0$, então a falta é bifásica para terra entre as fases A e B (de forma análoga para faltas bifásicas para terra do tipo ACT e BCT).
4. Se $\Delta I_a > 0$, $\Delta I_b > 0$, $\Delta I_c > 0$ e $|I_r| = 0$, então a falta é trifásica.

sendo I_r a corrente residual no sistema. ΔI_a , ΔI_b e ΔI_c são calculados como segue:

$$\Delta I_a = |\hat{I}_a| - THV, \quad (C.1a)$$

$$\Delta I_b = |\hat{I}_b| - THV, \quad (C.1b)$$

$$\Delta I_c = |\hat{I}_c| - THV, \quad (C.1c)$$

sendo \hat{I}_a , \hat{I}_b e \hat{I}_c os fasores das correntes nas fases A, B e C, respectivamente; THV um limiar pré-estabelecido, maior que o valor da corrente de pré-falta.

Na prática, o sistema elétrico não é balanceado e os sinais estão sujeitos a erros de aquisição, sendo necessária a utilização de um limiar ($I_{r_{min}}$) para verificação da corrente I_r .

A análise das sobrecorrentes para detecção e classificação de faltas é comprometida à medida que a impedância de falta aumenta, visto que os valores de regime permanente das correntes

de falta tendem a diminuir. Além do mais, torna-se difícil selecionar o valor mais adequado do limiar para as diversas situações de operação do sistema e de falta.

MÉTODO DO VALOR RMS DAS TENSÕES PARA DETECÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Um método convencional bastante simples para detecção de afundamentos de tensão é o método baseado no valor RMS da tensão (BOLLEN, 2000). A tensão RMS (V_{RMS}) em uma determinada amostra k de uma tensão v é calculada como segue

$$V_{RMS}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=k-N}^k [v(m)]^2}, \quad (\text{D.1})$$

em que N é o número de amostras em um ciclo.

O valor RMS da tensão é normalmente calculado amostra por amostra e o afundamento de tensão é detectado quando o valor RMS é inferior a um limiar, geralmente 90% do valor RMS do regime permanente, por um tempo superior a meio ciclo.

O valor RMS da tensão (Equação D.1) é normalmente utilizado como referência em métodos alternativos de detecção de afundamentos de tensão e apresenta bons resultados. Porém, a identificação precisa dos instantes inicial e final do distúrbio é comprometida pelo uso da Equação D.1 (BOLLEN, 2000).

Outro método convencional muito eficiente para o monitoramento de afundamentos de tensão é o método baseado na análise do valor fundamental da tensão, calculado com a TRF de um ciclo, amostra por amostra (BOLLEN, 2000). A detecção também pode ser confirmada quando o valor absoluto da tensão for inferior a um limiar, por um período de no mínimo meio ciclo. Geralmente, o limiar é de 90% do valor de referência no regime permanente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADU, T. An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 3, Jul 2002.
- 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.
- BO, Z. Q.; AGGARWAL, R. K.; JOHNS, A. T.; LI, H. Y.; SONG, Y. H. A new approach to phase selection using fault generated high frequency noise and neural networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1, p. 106–115, Jan 1997. ISSN 0885-8977.
- BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems*. New York, USA: IEEE, 2000.
- BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y.-H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. New York, USA: IEEE, 2006.
- 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.
- BRADLEY, A. D.; GRAY, C. B.; O'KELLY, D. Transient compensation of current transformers. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, n. 4, p. 1264–1271, Jul/Aug 1978.
- BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; PIRES, F. A. C. Daubechies wavelets in quality of electrical power. In: *Proceedings. 8th International Conference on Harmonics And Quality of Power*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 1, p. 511–515 vol.1.

- BURRUS, C. S.; RAMESH, A. G.; GUO, H. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.
- CARVALHO, A. C. C. *Disjuntores e Chaves: Aplicações em sistemas de potência*. Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1995.
- CHANDA, D.; KISHORE, N. K.; SINHA, A. K. Application of wavelet multiresolution analysis for identification and classification of faults on transmission lines. *Electric Power System Research*, p. 323–333, Nov. 2004.
- CHOWDHURI, P. *Electromagnetic Transients in Power Systems*. Great Britain: [s.n.], 1996.
- CHUANG, C. L.; LU, Y. L.; HUANG, T. L.; HSIAO, Y. T.; JIANG, J. A. Recognition of multiple PQ disturbances using dynamic structure neural networks - part 1: Theoretical introduction. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, Dalian, China, Oct. 2005.
- CHUANG, C. L.; LU, Y. L.; HUANG, T. L.; HSIAO, Y. T.; JIANG, J. A. Recognition of multiple PQ disturbances using dynamic structure neural networks - part 2: Implementation and applications. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, Dalian, China, Oct. 2005.
- COSTA, F. B. *Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 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*, Campina Grande, Brasil, Jul 2006.
- COSTA, F. B.; SILVA, K. M.; DANTAS, K. M. C.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. A method for fault classification in transmission lines based on ANN and wavelet coefficients energy. *VII World Congress on Computational Inteligency*, Vancouver, Canada, July 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. *Congresso Brasileiro de Automática*, Out 2006.

- COSTA, F. B.; SILVA, K. M.; DANTAS, K. M. C.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. A wavelet-based algorithm for disturbances detection using oscillographic data. *International Conference on Power Systems Transients*, Lyon, France, jun 2007.
- 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*, Mar 2006.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. An ann-based algorithm to classify power system events. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Jul 2008.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Detection and classification of power quality disturbances by wavelet transform. *Congresso Brasileiro de Automática*, Out 2008.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. A wavelet-based algorithm to analyze oscillographic data with single and multiple disturbances. *IEEE PES General Meeting*, Pittsburgh, USA, jun 2008.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Analysis of faults and voltage sags due to faults in electrical power systems. *VIII Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica*, Blumenau, Brasil, Ago 2009.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Discrete wavelet transform in power systems: Transient disturbance analysis. *International Symposium on High Voltage Engineering*, Cape Town, South Afric, Aug 2009.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. A wavelet-based method for detection and classification of single and crosscountry faults in transmission lines. *International Conference on Power Systems Transients*, Kyoto, Japan, jun 2009.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Detecção de faltas evolutivas e múltiplos distúrbios em registros oscilográficos baseada na transformada wavelet discreta. *Revista Controle e Automação*, p. 173–184, Mar 2010.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines. *IET Electronics Letters*, p. 753–755, May 2010.

- 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 da Energia Elétrica*, Agos 2005.
- 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*, p. Cascais, Portugal, Oct 2006.
- 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.
- DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A.; JÚNIOR, D. F.; CARDOSO, G. A.; FONSECA, L. C. A. Avaliação de chaveamento controlado de linhas de transmissão em tempo real via rtds. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Recife, Brasil, Nov. 2009.
- DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM, 1992.
- DAUSTEN, T.; KULIEKE, B. Neural network approach to fault classification for high speed protective relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 2, p. 1002–1009, Apr 1995.
- DICK, E.; FISCHER, D.; MARTTILA, R.; MULKINS, C. Point-on-wave capacitor switching and adjustable speed drives. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 3, p. 1367–1372, Jul 1996.
- DOI, H.; GOTO, M.; KAWAI, T.; YOKOKAWA, S.; SUZUKI, T. Advanced power system analogue simulator. *IEEE Transaction on Power Systems*, p. 962–968, Aug 1990.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. H. *Electrical Power Systems Quality*. 2a.. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

- ELKALASHY, N.; TARHUNI, N.; LEHTONEN, M. Simplified probabilistic selectivity technique for earth fault detection in unearthed mv networks. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 3, n. 2, p. 145–153, february 2009. ISSN 1751-8687.
- FUKUYAMA, Y.; UEKI, Y. Fault analysis system using neural networks and artificial intelligence. In: *Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, ANNPS '93*., [S.l.: s.n.], 1993. p. 20–25.
- GAOUDA, A. M.; KANOUN, S. H.; SALAMA, M. M. A.; CHIKHANI, A. Y. Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement. *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.*, p. 310–318, May 2002.
- GENCER Özgür; ÖZTÜRK, S.; ERFIDAN, T. A new approach to voltage sag detection based on wavelet transform. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 32, n. 2, p. 133–140, 2010. ISSN 0142-0615.
- GIESBRECHT, W.; JIANG, X.; MAZUR, G. Model development of an actual hvdc control for the rtds simulator. *International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD '98*., v. 2, p. 449–454, 1998.
- GIRSI, A. A. A new Kalman filtering based digital distance relay. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 9, p. 3471–3480, Sep 1982.
- GIRSI, A. A.; BROWN, R. G. Modelling of fault-induced noise signals for computer relaying applications. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, n. 9, p. 2834–2841, Sep 1983.
- GROSSMAN, A.; MORLET, J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Mathematical Analysis*, p. 155–166, 1984.
- GU, Y. H.; BOLLEN, M. H. J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 4, p. 1279–1284, Oct 2000. ISSN 0885-8977.
- HEYDT, G. T.; GALLI, A. W. Transient power quality problems analysed using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 2, p. 908–915, Apr 1997.

- HONG, Y. Y.; CHANG-CHIAN, P. C. Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence. *IET Gener. Transm. Distrib.*, v. 2, n. 4, p. 566–575, June 2008.
- IEE. *IEE. Power System Protection - Volume 1: Principles and Components*. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers., 1995.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. Summary update of practices on breaker failure protection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 3, p. 555–563, Mar 1982.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *IEEE Standard Common Format for Transient Data exchange (COMTRADE) for Power Systems*. New York, USA, 1991.
- IEEE Power System Relaying Committee. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. <<http://www.pes-psrc.org/Reports-/d6report.zip>>, 2004.
- IEEE Power System Relaying Committee Report. *Considerations for Use of Disturbance Recorders*. Acesso em <<http://www.pes-psrc.org/Reports/C5-Final%20Report.pdf>>, 2006.
- 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.
- JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance-revisited. *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 949–956, Apr 1989.
- 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, part 1: Signal measurement. *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, v. 141, n. 2, p. 133–140, March 1994.

- KANG, Y. C.; LIM, U. J.; KANG, S. H.; CROSSLEY, P. A. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1642–1649, Oct 2004.
- 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.
- KIM, C.-H.; KIM, H.; KO, Y.-H.; BYUN, S.-H.; JOHNS, R. K. A. A. T. A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform. *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 17, n. 4, p. 921–929, Oct 2002.
- KUFFEL, R.; GIESBRECHT, J.; MAGUIRE, T.; WIERCKX, R.; MCLAREN, P. Rtds - a fully digital power system simulator operating in real time. *First International Conference on Digital Power System Simulators*, Winnipeg, Canada, May 1995.
- 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, China, p. 2681–2684, June 1997.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP - Alternative Transient Program*: Rule book. Herverlee, Belgium, 1987.
- LI, F.; LI, Y.; AGGARWAL, R. K. Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, v. 149, n. 4, p. 497–503, July 2002.
- LIANG, J.; ELANGO VAN, S.; DEVOTTA, J. B. X. A wavelet multiresolution analysis approach to fault detection and classification in transmission lines. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 20, n. 5, p. 327–332, 1998.

- 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.
- MAO, P. L.; AGGARWAL, R. K. A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, v. 16, n. 4, p. 654–660, Oct 2001.
- MARTIN, F.; AGUADO, J. A. Wavelet-based ANN approach for transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 4, p. 1572–1574, Oct. 2003. ISSN 0885-8977.
- MCLAREN, P.; KUFFEL, R.; WIERCKX, R.; GIESBRECHT, J.; ARENDT, L. A real time digital simulator for testing relays. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, v. 7, n. 1, p. 207–213, Jan 1992.
- 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.
- OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V.; CARNEIRO, A. A. F. M.; ARRUDA, E. F.; FILHO, O. D.; SOUZA, S. A. Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica. *Controle e Automação*, v. 17, n. 3, p. 331–341, Jul 2006.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. Discrete-time signal processing. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1989.
- OUELLETTE, D.; GEISBRECHT, W.; WIERCKX, R.; FORSYTH, P. Modelling an impedance relay using a real time digital simulator. *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, v. 2, p. 665–668, Apr. 2004.
- OUELLETTE, D.; WIERCKX, R.; MCLAREN, P. Using a multi-threaded time-step to model a multi-function relay in a real time digital simulator. *IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, Glasgow, Scotland, p. 162–167, Mar. 2006.

- PANIGRAHI, B.; PANDI, V. Optimal feature selection for classification of power quality disturbances using wavelet packet-based fuzzy k-nearest neighbour algorithm. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 3, n. 3, p. 296–306, march 2009. ISSN 1751-8687.
- 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 1999 Winter Meeting*, v. 2, p. 1310–1315, Feb. 1999.
- PATTERSON, R. W. The importance of power system event analysis. *8th Annual Fault and Disturbance Analysis Conference*, Atlanta, Georgia, Apr. 2005.
- PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. *Wevelet Methods for Time Series Analysis*. New York, USA: Cambridge University Press., 2000.
- PERERA, N.; RAJAPAKSE, A. D.; MUTHUMUNI, D.; JAYASINGHE, R. P. Development of an on-line transient classification. *Proceedings of IEEE International Conference on Harmonics and Power Systems*, Kyoto, Japan, jun 2009.
- 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.
- PRICE, E.; WARREN, B. Fault analysis using protective relay digital fault records from the big rivers electric corporation 161 kv system. *Fault and Disturbance Analysis Conference*, Atlanta, Georgia, May. 2003.
- 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.
- 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.

- RIBEIRO, P. F. wavelet transform: an advanced tool for analyzing non-stationary harmonic distortions in power system. *Proceedings of IEEE International Conference on Harmonics and Power Systems*, Bologna, Italy, p. 365–369, Set 1994.
- ROBERTSON, D. C.; CAMPS, O. I.; GISH, J. S. M. W. B. Wavelets and electromagnetic power system transients. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 1050–1058, Apr 1996.
- SALIM, R.; OLIVEIRA, K. de; FILOMENA, A.; RESENER, M.; BRETAS, A. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p. 1846–1856, Oct. 2008. ISSN 0885-8977.
- SANKARAN, C. *Power Quality*. Boca Raton, USA: CRC PRESS, 2002.
- SANTOS, C. K. S. *CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS NA REDE ELÉTRICA USANDO REDES NEURAIS E WAVELETS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- SANTOSO, S. Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. part 1: Theoretical foundation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, p. 222–228, Jan 2000.
- SANTOSO, S. Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. part 2: Application. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, p. 229–235, Jan 2000.
- SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis. *Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, p. 166–169, Oct 1994.
- 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.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A. Distance protection using a novel phasor estimation algorithm based on wavelet transform. *IEEE PES General Meeting*, Pittsburgh, USA, jun 2008.
- SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 4, p. 2058–2063, Oct 2006.
- 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. *Controle e Automação*, v. 18, n. 2, p. 163–172, Maio 2007.
- SILVEIRA, P. M.; SEARA, R.; ZÜRIN, H. H. An approach using wavelet transform for fault type identification in digital relaying. *Proc. Power Engineering Society Summer Meeting*, Edmonton, Canada, v. 2, p. 937–942, Set 1999.
- 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. *Electric Power System Research*, v. 43, n. 2, p. 125–132, 1997.
- 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.
- SWIFT, G. W. The spectra of fault-induced transients. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98, n. 3, p. 940–947, May 1979.

- TLEIS, A. N. D. *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. Oxford, UK: Elsevier Ltd., 2008.
- WIKINSON, W. A.; COX, M. D. Discrete wavelet analysis of power system transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 4, p. 2038–2044, Nov 1996.
- 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.
- ZAHRA, F.; JEYASURYA, B.; QUAICOE, J. E. High-speed transmission line relaying using artificial neural network. *Electric Power System Research*, v. 53, n. 3, p. 173–179, Mar. 2000.
- ZANETA Jr., L. C. *Trasitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- ZIN, A.; KARIM, S. A. The utilization of digital fault recorders in protection system analysis on tenaga nasional berhad transmission system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4, p. 2040–2046, Oct. 2007. ISSN 0885-8977.

ÍNDICE REMISSIVO

- Acoplamento capacitivo, 95
- Acoplamento elétrico, 62
- Acoplamento eletromagnético, 54, 67
- Acoplamento físico, 66
- Acoplamento indutivo, 95
- Afundamento de tensão, 61, 84, 111, 136
- Algoritmo piramidal, 25
- Análise automática de distúrbios, 130
- Análise de ocorrências e perturbações, 1
- Análise de regressão, 40, 98
- Análise em tempo real, 4, 56, 109, 128
- Análise estatística, 51
- Análise manual, 2
- Análise multiresolução, 8
- Ângulo de incidência de falta, 54, 92, 93
- Arco elétrico, 55
- Atraso na atuação, 55
- Atuação da proteção, 86
- Aumento brusco de energia, 56
- Auto-religamento de LT, 84
- Bancos de capacitores, 79
- Banda de passagem, 22
- Canais analógicos, 128
- Canais digitais, 123, 128
- Canais digitais de diagnóstico, 56
- Carga capacitiva, 77
- Chaveamento de bancos de capacitores, 47
- Chaveamento de cargas, 47
- Chaveamentos de cargas pesadas, 61
- Classificação de faltas, 92, 123
- Coefficientes de aproximação, 21, 131
- Coefficientes de detalhes, 21
- Coefficientes de reflexão, 71
- Coefficientes wavelet, 21, 49, 131
- Colapso de energia elétrica, 1
- Componente DC, 54, 95
- Componente de decaimento exponencial, 26
- Componente fundamental, 48, 95
- Componentes de alta frequência, 24
- Componentes de baixa frequência, 24
- Componentes de frequência, 36
- Componentes harmônicas, 36, 48
- Componentes transitórias, 37
- Comprimento da LT, 66
- COMTRADE, 129
- Contato mecânico, 67
- Convolução, 21
- Coordenadas de falta, 113, 136
- Correntes capacitivas, 73
- Correntes de falta, 53
- Correntes sãs, 114
- Curto-circuito, 54
- Desacoplamento mecânico, 74

- Descargas atmosféricas, 46
- Descargas atmosféricas diretas, 46
- Descargas atmosféricas indiretas, 46
- Desligamento, 59, 74
- Desligamento de bancos de capacitores, 82
- Desligamento de LT, 74
- Deslocamentos circulares, 26
- Desvio padrão, 48
- Deteção de distorções, 33
- Deteção dos distúrbios transitórios, 37
- Deteção em tempo real dos distúrbios, 87
- Diagnóstico de distúrbios, 3
- Diagnóstico de distúrbios transitórios, 136
- Disjuntor, 54
- Dispersão mecânica, 54
- Dispositivos de monitoramento, 65
- Distúrbios transitórios, 2, 129, 136
- Distância de falta, 121
- Distorções harmônicas, 37, 50
- Distribuição de probabilidade normal, 48
- Efeito capacitivo, 68
- Efeito de borda, 26
- Elevação de tensão, 62
- Eliminação da falta, 54
- Energia do sinal, 36
- Energia dos coeficientes de aproximação, 36, 45, 64, 119
- Energia dos coeficientes wavelet, 4, 36, 45, 56, 93, 128
- Energia dos transitórios, 4, 37, 56, 92
- Energias janeladas, 41
- Energias médias, 60
- Energização, 65
- Energização de bancos de capacitores, 79
- Energização de LT, 65
- Equipamentos de monitoração, 46
- Espectro de frequência, 22, 54
- Falta, 52, 84, 86
- Falta bifásica, 60, 102, 136
- Falta bifásica para terra, 105, 136
- Falta evolutiva, 60, 125, 150
- Falta monofásica, 52, 95, 136
- Falta permanente, 86
- Falta simples, 60
- Falta trifásica, 108, 136
- Faltas temporárias, 84
- Fenômenos transitórios, 45
- Filtragens digitais, 21
- Filtro escala, 109
- Filtro passa-alta, 21
- Filtro passa-baixa, 21, 129
- Filtro wavelet, 109
- Filtros anti-aliasing, 46
- Filtros espelhados em quadraturas, 22
- Frequência de amostragem, 21
- Frequência de Nyquist, 46, 129
- Frequência fundamental, 26
- Função degrau, 26
- Função densidade de probabilidade, 48
- Harmônicas, 95

- Histograma, 48
- Incidência de transitórios, 52, 60
- Instante final da falta, 55
- Instante inicial das faltas, 53
- Instante inicial dos transitórios, 67
- Instrumentos de medição, 93
- Inteligência artificial, 12
- Interrupção de tensão, 62
- Isoladores, 52
- Linhas paralelas, 62
- Localização de falta, 54, 92
- Método da sobrecorrente, 139
- Módulo CBuilder, 132
- Módulo draft, 131
- Módulo runtime, 132
- Múltiplas reflexões de ondas, 68
- Múltiplos distúrbios, 156
- Múltiplos distúrbios transitórios, 58, 84
- Meio isolante, 53
- Ondas viajantes, 46
- Oscilações de alta frequência, 53
- Pólos, 66
- Parâmetros distribuídos, 92
- Período de espera, 59
- Período de falta, 52
- Período de pós-falta, 52
- Período de pré-falta, 52
- Período transitórios, 52
- Planos de faltas, 117
- Pré-arco, 66
- Pré-transitórios, 67, 74
- Primário do TC, 55
- Primeira escala, 22
- Primeira zona, 54
- Princípio da superposição, 71
- Propagação de ondas, 71, 94
- Proteção, 52
- Real-Time Digital Simulator, 2
- Reconhecimento de padrões, 12
- Rede de oscilografia, 2
- Redes neurais artificiais, 11
- Reflexões de ondas viajantes, 53
- Registradores digitais de perturbações, 1
- Registros oscilográficos, 2
- Registros oscilográficos reais, 45, 161
- Relé de distância, 54
- Religamento automático, 84
- Resistência de falta, 54, 92, 110, 121
- Resistores de pré-inserção, 66
- Resposta em frequência, 24
- Ruídos, 48
- Ruídos de alta frequência, 49
- Ruídos pós-falta, 55
- Ruptura dielétrica, 53
- Saturação dos TC, 54
- Secundário do TC, 55
- Segunda escala, 22
- Simulações digitais em tempo real, 128
- Simulações em tempo real, 136

- Sistema elétrico, 92, 134
- Sistema equilibrado, 95
- Sistema trifásico, 54
- Sobrecorrente, 54, 111
- Sobretensões transitórias, 46
- Subamostragem, 21, 30
- Suportabilidade dos isolamentos, 46
- Taxa de acerto, 136
- Taxa de amostragem, 45, 95, 131
- Tempo de subida, 46
- Tempo de trânsito, 99
- Tempo morto, 84
- Tentativa de religamento, 86
- Terceira escala, 22
- Terminal energizado, 65
- Terminal local, 54, 99
- Terminal monitorado, 55, 65
- Terminal remoto, 54, 66
- Transformada de Haar, 21
- Transformada discreta de Fourier, 8
- Transformada rápida de Fourier, 8
- Transformada wavelet, 4
- Transformada wavelet contínua, 9
- Transformada wavelet discreta, 4, 21
- Transformada wavelet discreta redundante, 4,
- 30
- Transformadores de corrente, 54
- Transformadores de instrumento, 134
- Transformadores de potencial capacitivos, 55
- Transitórios, 45
- Transitórios de chaveamento, 65, 74, 81, 83, 84
- Transitórios de falta, 53, 92, 136
- Transitórios impulsivos, 45
- Transitórios induzidos, 67
- Transitórios oscilatórios, 45
- Transitórios pós-falta, 55
- Transitórios pré-falta, 53
- Triângulo de falta, 114, 136
- Valor eficaz, 61
- Valor médio, 48
- Valor RMS, 63
- Variáveis binárias de diagnóstico, 56
- Variável aleatória, 48
- Wavelet Daubechies, 109
- Wavelet mãe, 24, 98, 132
- Zona secundária, 54
- Zonas de proteção, 54