



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA
Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

ANDRÉ AUGUSTO FERREIRA
Engenheiro Eletricista

PROF. DR. SIGMAR MAURER DECKMANN
Orientador

*Dissertação submetida à
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.*

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Morelato França – FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. José Antenor Pomílio – FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Néelson Kagan – Politécnica/USP
Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann – FEEC/UNICAMP

Campinas – SP – Brasil, 26 de março de 2002.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F413c Ferreira, André Augusto
 Caracterização e análise de variações de tensão de
 curta duração / André Augusto Ferreira.--Campinas, SP:
 [s.n.], 2002.

 Orientador: Sigmar Maurer Deckmann.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação.

 1. Energia elétrica. 2. Indicadores. 3. Medição. 4.
 Processamento de sinais – Técnicas digitais. I.
 Deckmann, Sigmar Maurer. II. Universidade Estadual
 de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação. III. Título.

*Dedico este trabalho à minha querida irmã Edna, à minha amada esposa Adriana
e em especial aos meus pais Augusto José e Maria Aparecida Ferreira.*

Resumo

O trabalho apresenta uma nova metodologia para caracterização e análise de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), bem como uma revisão dos métodos tradicionais empregados internacionalmente. Inicialmente é realizada uma análise sobre as técnicas de processamento dos sinais de tensão, as formas de detecção de eventos e formas para o armazenamento e tratamento dos registros dos eventos capturados.

As metodologias tradicionais de análise de VTCD baseiam-se na caracterização do evento através dos parâmetros de magnitude máxima, ou mínima, e de duração do evento. Entretanto, diversos autores alertam que somente esses parâmetros são insuficientes para avaliar o impacto dos eventos sobre cargas sensíveis.

Como alternativa, é proposta e implementada uma nova metodologia, baseada na caracterização do evento através da curva de duração por níveis, para calcular índices de severidade das VTCD, relacionáveis com a sensibilidade de equipamentos e que permitam verificar a propagação dos distúrbios através do sistema elétrico de potência.

Abstract

This work presents a new methodology to characterize and analyze voltage sags and swells. A revision of the internationally most used methodologies are also focused. Initially the signal processing techniques are presented along with a discussion about voltage disturbances detection, voltage level evaluation and data storage methods of the captured events.

Traditional methodologies used for sags and swells analysis are based solely on the events magnitude maximum, or minimum, and duration. Nevertheless, several authors pointed out the fact that these two parameters are insufficient to properly characterize the impact of non-regular voltage sags and swells upon sensible loads.

An alternative has been proposed and implemented, considering the event voltage level duration curve, in order to calculate severity indices for the disturbing events and to relate these indices with loads sensitivity curves. The method can also be used to analyze the propagation of the disturbing effect through a power system.

Agradecimentos

Ao orientador e amigo Sigmar Maurer Deckmann por confiar e auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Clodoaldo A. M. Lima, Fernando P. Marafão, Gustavo Peres B. Castro e Moisés V. Ribeiro pela amizade, apoio e sugestões construtivas.

Aos amigos e professores do DSCE pela fraternidade, respeito, incentivo e por colaboraram, direta ou indiretamente, com este trabalho.

Aos amigos do CRITT, da PREDITEC, os professores dos departamentos de Física e de Engenharia Elétrica da UFJF e em especial ao meu orientador de Trabalho Final de Curso, Pedro Gomes Barbosa, por haverem contribuído para a minha capacitação durante o período de graduação.

A UNICAMP, a Faculdade de Engenharia Elétrica, ao Departamento de Sistema Controle e Energia e aos seus funcionários por garantirem uma infra-estrutura adequada para realizar este trabalho.

A CAPES por subsidiar esta pesquisa e acreditar que a base para o desenvolvimento do país é a formação de pessoal qualificado dentro das universidades.

Aos meus pais, meus irmãos e, em especial, a minha sobrinha Carolina, pelo carinho, dedicação e apoio em todos os momentos de minha vida.

A minha irmã Edna por me compreender e apoiar de forma irrestrita para o meu progresso espiritual e cultural.

A minha amada esposa Adriana por incentivar-me na conclusão deste trabalho.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Sumário	xi
Lista de Siglas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxiii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Qualidade de Energia Elétrica	1
1.2 Variações de Tensão de Curta Duração.....	5
1.2.1 <i>Classificação das VTCD</i>	6
1.2.2 <i>Curvas de Sensibilidade a VTCD</i>	8
1.2.3 <i>Frequência dos Distúrbios de VTCD</i>	10
1.3 Motivação e Objetivos do Trabalho	11
1.4 Organização do Trabalho.....	12

Capítulo 2: Processo de Medição de VTCD	13
2.1 Introdução	13
2.2 Valor Eficaz da Tensão.....	14
2.2.1 <i>Técnicas de Processamento Digital do Sinal de Tensão</i>	15
2.2.2 <i>Avaliação das Técnicas de Cálculo do Valor Eficaz</i>	17
2.3 Detecção de VTCD	20
2.3.1 <i>Faixas de Histerese</i>	21
2.3.2 <i>Agregação Temporal de Eventos</i>	22
2.3.3 <i>Duração do Evento</i>	23
2.3.4 <i>Tensão de Referência</i>	23
2.4 Histogramas de Frequência por Nível	24
2.5 Armazenamento de Dados	28
2.5.1 <i>Armazenamento em Arquivos</i>	29
2.5.2 <i>Banco de Dados Relacional</i>	29
2.5.3 <i>Compactação de Dados</i>	30
2.6 Conclusões.....	31
Capítulo 3: Indicadores para Quantificação de VTCD	33
3.1 Introdução	33
3.2 Formas de Caracterização de VTCD	34
3.2.1 <i>Caracterização através da Magnitude e da Duração do Evento</i>	34
3.2.2 <i>Caracterização através da Curvas de Duração por Níveis</i>	38
3.2.3 <i>Caracterização através da Perda de Tensão</i>	40
3.2.4 <i>Caracterização através da Perda de Energia</i>	41
3.3 Índices de Severidade para VTCD	42
3.3.1 <i>Índice baseado na Magnitude e na Duração do Evento</i>	43
3.3.2 <i>Índice baseado na Curva de Duração por Níveis do Evento</i>	44

3.4 Avaliação do Desempenho do SEP face a VTCD	46
3.4.1 Método Detroit Edison	46
3.4.2 Método da Magnitude e Duração do Evento	47
3.4.3 Método da Incidência Acumulada de Eventos	49
3.4.4 Método proposto pela EFEI	52
3.4.5 Método EPRI/Electrotek de avaliação do impacto sobre consumidores	54
3.4.6 Método da Energia de Afundamento de Thallam	57
3.4.7 Indicador baseado na Severidade e Frequência da Violação	58
3.5 Conclusões	63
Capítulo 4: Análise de Registros de VTCD	67
4.1 Introdução	67
4.2 Sistema Elétrico de Potência	68
4.3 Analisador Trifásico de VTCD	70
4.3.1 Descrição do Sistema	70
4.3.2 Armazenamento dos dados em arquivo	72
4.3.3 Classificação Automática de Eventos	73
4.3.4 Análise dos Registros de VTCD	73
4.4 Estudo do Mecanismo de Propagação das VTCD	74
4.4.1 Interrupções de Tensão	74
4.4.2 Afundamentos de Tensão	77
4.4.3 Elevações de Tensão	79
4.4.4 Propagação dos Eventos	81
4.5 Conclusões	83
Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros	85
5.1 Conclusões Finais	85
5.2 Trabalhos Futuros	87

Bibliografia.....	89
Apêndice A: Caracterização de eventos extraídos do IEEE	93
Apêndice B: Caracterização da propagação de uma falta simulada na seção 4.4.4.....	99

Lista de Siglas

AMT	Afundamentos Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATT	Afundamentos Temporário de Tensão
CA.....	Corrente Alternada
CBEMA.....	“Computer Business Equipment Manufacturers Association”
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
EMT.....	Elevação Momentânea de Tensão
EUA.....	Estados Unidos da América
ETT.....	Elevação Temporária de Tensão
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
FACTS.....	“Flexible Alternating Current Transmission Systems”
FIC.....	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FIFO	“First In – First Out”
IEEE	“Institute of Electrical and Electronics Engineers”
IMT.....	Interrupção Momentânea de Tensão
ITE	“Information Technology Equipment”
ITIC	“Information Technology Industry Council”
ITT	Interrupção Temporária de Tensão
ONS.....	Operador Nacional do Sistema

OOP	Programação Orientada a Objetos
PLL	“Phase Locked Loop”
SEP	Sistema Elétrico de Potência

Lista de Símbolos

Tensões

v	Tensão instantânea
V_{ef}, V, m	Magnitude da tensão eficaz do evento
V_{cd}	Magnitude da tensão eficaz associada à curva de duração por níveis do evento
V_{sens}	Magnitude da tensão eficaz associada à curva de sensibilidade do equipamento

Tempo

d	Duração do evento
t	Instante de tempo
T	Período de tempo da componente fundamental de frequência

Amostragem

j	Janela discreta de amostras
k	Instante de amostragem
N	Número de amostras da janela
z	Operador da transformada z

Unidades e Números

Hz	Hertz
pu	Por unidade
V	Volts
Z	Números inteiros

Indicadores para Variações de Tensão de Curta Duração

E_{AT}	Energia do Afundamento de Tensão
IFV	Indicador de Frequência de Violação
P_V	Perda de Tensão
P_E	Perda de Energia
P_{EAT}	Perda de Energia para Afundamentos de Tensão
“ <i>sag score</i> ”	Perda de Tensão pela metodologia proposta por Detroit Edison
S_{md}	Índice de Severidade baseado na magnitude e na duração do evento
S_{cd}	Índice de Severidade baseado na curva de duração por níveis do evento
\bar{S}_{cd}	Energia Média dos eventos devido a violação da região de tolerância de tensões
W_{EAT}	Índice de Energia do Afundamento de Tensão
\bar{W}_{EAT}	Índice Médio de Energia do Afundamento de Tensão

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.2.1: Distúrbio tipo VTCD: (a) forma de onda; (b) curva de valor eficaz.	6
Figura 1.2.2: Curva de sensibilidade para computadores (CBEMA).....	8
Figura 1.2.3: Curva de sensibilidade para equipamentos de informação (ITIC).....	9
Figura 1.2.4: Conformidade do evento da Fig. 1.2.1 com a curva ITIC.	10
Figura 1.2.5: Eventos ocorridos durante um período de medição.	10

Capítulo 2

Figura 2.1.1: Esquema de Monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica.	14
Figura 2.2.1: Diagrama de blocos esquemático para o cálculo do valor eficaz.	15
Figura 2.2.2: Esquema de armazenamento de amostras em vetor deslizante FIFO.	16
Figura 2.2.3: Esquema de armazenamento de amostras em lista circular.	16
Figura 2.2.4: Curvas de: (a) forma de onda; (b) técnicas de apuração da tensão eficaz.	17
Figura 2.2.5: Comparação entre as técnicas de atualização do valor eficaz.	18
Figura 2.2.6: Curvas de: (a) tensão eficaz; (b) potência instantânea do evento.....	19
Figura 2.3.1: Exemplo de detecção de VTCD: (a) forma de onda; (b) tensão eficaz.	21

Figura 2.3.2: Exemplo de aplicação de limites de faixa de histerese.	21
Figura 2.4.1: Curvas: (a) forma de onda; (b) tensão eficaz do evento.	25
Figura 2.4.2: Esquema de classificação de amostras.	25
Figura 2.4.3: Histograma de Frequência de Nível.	27
Figura 2.4.4: Histograma de Frequência por Nível.	27
Figura 2.4.5: Histograma de Frequências por Nível.	28
 Capítulo 3	
Figura 3.2.1: Curvas do evento: (a) forma de onda; (b) valor eficaz.	35
Figura 3.2.2: Histogramas de Frequência por Nível construído com resolução e atualização do cálculo do valor eficaz de: (a) 10% e discreta; (b) 1% e contínua, respectivamente.	36
Figura 3.2.3: Conformidade do evento em relação à curva ITIC.	37
Figura 3.2.4: Exemplo da aplicação da metodologia EPRI/Electrotek.	37
Figura 3.2.5: Curvas de Duração por Níveis com resolução de: (a) 10%; (b) 1%.	38
Figura 3.2.6: Curvas de: (a) forma de onda do evento; (b) duração por níveis.	40
Figura 3.3.1: Área associada à violação da curva de sensibilidade (ITIC).	44
Figura 3.3.2: Curvas de: (a) forma de onda; (b) durações por níveis do evento.	45
Figura 3.4.1: Representação gráfica dos limites para VTCD, segundo a NRS 048.	49
Figura 3.4.2: Gráfico de coordenadas de afundamentos de tensão.	51
Figura 3.4.3: Conformidade com a curva de sensibilidade do equipamento.	52
Figura 3.4.4: Índice SARFI: (a) distribuição dos eventos em faixas de tensão; (b) SARFI ₇₀ para diferentes barras do sistema.	56
Figura 3.4.5: Conformidade dos eventos com a curva ITIC.	56
Figura 3.4.6: Indicador de Frequência de Violações para Afundamentos de Tensão na fase A.	62

Capítulo 4

Figura 4.2.1: Diagrama unifilar simplificado do Sistema Elétrico de Potência.	69
Figura 4.2.2: Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico utilizado na simulação.	70
Figura 4.3.1: Analisador Trifásico de Variações de Tensão de Curta Duração.	71
Figura 4.4.1: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis da interrupção momentânea de tensão medida na barra 3 do sistema.	75
Figura 4.4.2: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis da interrupção momentânea de tensão medida na barra 4 do sistema.	76
Figura 4.4.3: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do afundamento momentâneo de tensão registrado na barra 2 do sistema.	77
Figura 4.4.4: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do afundamento momentâneo de tensão registrado na barra 1 do sistema.	78
Figura 4.4.5: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis de um afundamento momentâneo de tensão seguido de um “aumento” de tensão na barra 6.	79
Figura 4.4.6: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis de um afundamento momentâneo de tensão seguido de um “aumento” de tensão na barra 5.	80

Apêndice A

Figura i: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 21/09/1994 às 07:17:44.	93
Figura ii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 23/09/1994 às 15:40:14.	93
Figura iii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 30/10/1994 às 10:52:18.	94
Figura iv: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 01/12/1994 às 10:14:39.	94
Figura v: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 06/12/1994 às 11:34:54.	95

Figura vi: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 08/02/1995 às 19:01:16.	95
Figura vii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 01/05/1995 às 22:05:34.	96
Figura viii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 03/05/1995 às 08:42:39.	96
Figura ix: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 26/06/1995 às 21:07:17.	97
Figura x: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento ocorrido em 09/08/1995 às 12:27:37.	97

Apêndice B

Figura i: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 1 do sistema.	99
Figura ii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 2 do sistema.	99
Figura iii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 3 do sistema.	100
Figura iv: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 4 do sistema.	100
Figura v: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 5 do sistema.	101
Figura vi: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 6 do sistema.	101

Lista de Tabelas

Capítulo 1

Tabela 1.1: Classificação das VTCD, segundo IEEE 1159.....	7
Tabela 1.2: Classificação das VTCD, segundo ANEEL e ONS [8].....	7

Capítulo 2

Tabela 2.1: Tabela de frequências de observação por nível.....	26
--	----

Capítulo 3

Tabela 3.1: Tabela de distribuição de frequência de afundamentos de tensão da UNIPED.....	48
Tabela 3.2: Tabela de distribuição de frequência de afundamentos de tensão da IEC 61000-4-11.....	48
Tabela 3.3: Tabela de distribuição de frequência de afundamentos de tensão da NRS-048.....	49
Tabela 3.4: Distribuição hipotética da incidência dos eventos de uma barra do SEP.....	50
Tabela 3.5: Acumulação da incidência dos eventos de uma barra do SEP.....	50
Tabela 3.6: Tabela de indicadores EPRI/Electrotek para elevações de tensão.....	55

Tabela 3.7: Tabela de indicadores EPRI/Electrotek para afundamentos de tensão.	55
Tabela 3.8: Classificação e severidade dos eventos registrados.	61
Tabela 3.9: Avaliação do Desempenho do Sistema Elétrico.....	62
Tabela 3.10: Avaliação do Desempenho do Sistema Elétrico de forma simplificada.....	63

Capítulo 4

Tabela 4.1: Classificação e severidade dos eventos registrados.	81
Tabela 4.2: Classificação e severidade dos eventos registrados.	82

Capítulo 1

Introdução

1.1 Qualidade de Energia Elétrica

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é utilizado para expressar, através de indicadores qualitativos e quantitativos, os padrões de serviço e de produto oferecidos pelos diversos agentes do setor de energia elétrica aos consumidores. Basicamente busca retratar a continuidade do suprimento e a conformidade das formas de onda de tensão e corrente, tomando como referência as características consideradas adequadas para o bom desempenho do sistema elétrico.

O crescente interesse pela avaliação da QEE decorre do fato de que grande parte dos equipamentos e cargas elétricas atuais possuem componentes eletrônicos, que são afetados por variações bruscas de tensão (dv/dt) e de corrente (di/dt), deixando de funcionar como deveriam se não forem respeitados os limites previstos durante o projeto. Face às novas demandas tecnológicas pode-se dizer que os equipamentos eletro-eletrônicos atuais, ao incorporar mais e

mais funções de controle, tendem a tornar-se mais sensíveis a perturbações provenientes do Sistema Elétrico de Potência (SEP) [1]. Foi publicada recentemente uma estimativa de que os prejuízos financeiros só das indústrias dos Estados Unidos (EUA), devido aos distúrbios eletromagnéticos, atinjam a cifra de 20 bilhões de dólares anuais [2].

O desenvolvimento acelerado nas áreas de Eletrônica Digital e Eletrônica de Potência propiciou importantes avanços tecnológicos e novas aplicações não somente para a indústria, mas também para o comércio e para uso doméstico. Por conta desses avanços, os processos industriais tendem a ser altamente automatizados, grande parte do comércio e redes bancárias podem contar com sistemas de gerenciamento e fluxo de caixa informatizado e nas residências é possível encontrar os mais variados dispositivos para facilitar e automatizar os serviços no lar como, por exemplo, controle automático de iluminação, máquinas programáveis de lavar, de cozinhar, fornos de microondas, centrífugas ajustáveis, duchas quentes reguláveis, etc.

Os aparelhos que utilizam controle digital em geral são bastante sensíveis a variações de tensão na rede e dependem de suprimento de energia elétrica confiável e de boa qualidade para operarem satisfatoriamente. Já os dispositivos de potência, chaveados eletronicamente, costumam figurar entre os principais responsáveis pela geração de distúrbios na tensão, degradando a QEE, devido ao processo não-linear de chaveamento da corrente e da tensão.

Para amenizar tais problemas, por um lado busca-se desenvolver dispositivos eletrônicos digitais menos sensíveis às variações de tensão da rede, e por outro, está se consolidando uma nova classe de equipamentos de potência - FACTS (“Flexible Alternating Current Transmission Systems”), que utiliza os dispositivos eletrônicos de potência para suprimir, filtrar ou atenuar a propagação dos distúrbios através do SEP.

A melhor forma de avaliar o desempenho do sistema elétrico consiste em monitorar a qualidade da energia suprida através da apuração de indicadores que permitem avaliar o impacto dos distúrbios sobre os consumidores.

As principais categorias de distúrbios eletromagnéticos que degradam a Qualidade de Energia Elétrica são: harmônicas, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, variações de

freqüência, variações de tensão de longa duração e de curta duração [1]-[5].

As *harmônicas* são formas de onda utilizadas para expressar quantitativamente as distorções periódicas das ondas senoidais fundamentais de tensão ou de corrente. As principais fontes geradoras de harmônicas na rede elétrica são cargas não-lineares, como retificadores, fornos a arco e até mesmo transformadores operando sob baixo carregamento. O principal efeito nocivo provocado pelas harmônicas nos equipamentos elétricos projetados para operar na freqüência fundamental é o sobre-aquecimento dos condutores e do núcleo magnético, ocasionando a redução de vida útil do equipamento. Em geral, utilizam-se as séries de Fourier para avaliar o espectro e a intensidade dos componentes múltiplos inteiros da onda fundamental, constituintes da distorção periódica. Componentes múltiplos não-inteiros da freqüência fundamental são denominados de inter-harmônicas. Estes são pouco comuns na prática e costumam estar associados a efeitos transitórios e não sustentados ao longo do tempo. O grau de distorção da forma de onda também pode ser avaliado através de um índice global, denominado DHT (distorção harmônica total), que expressa a combinação quadrática dos componentes harmônicos individuais, normalizados pela fundamental.

As *flutuações de tensão* são caracterizadas por uma série randômica ou sustentada de variações da magnitude da tensão de operação. Os principais geradores de flutuações de tensão são fornos a arco, aparelhos de solda elétrica, bombas e compressores. Tais cargas variáveis podem provocar oscilações de potência na linha de alimentação e, no caso de grandes potências, podem provocar oscilações eletromecânicas entre geradores ou ressonâncias sub-síncronas entre turbinas. Mas o principal efeito provocado por essas flutuações é o da cintilação luminosa (“flicker”). O termo cintilação luminosa descreve o incômodo (irritação) visual do efeito das flutuações de tensão em equipamentos luminosos como, por exemplo, nas lâmpadas incandescentes. Este fenômeno é percebido pelo olho humano na faixa de modulação da tensão compreendida entre 1 e 30 Hz, sendo a sensibilidade visual máxima em torno de 8,8 Hz.

Os *desequilíbrios de tensão* são caracterizados por variações desiguais nas magnitudes de tensão e/ou por desvios do defasamento angular de 120° entre as fases de um sistema trifásico. Em geral são provocados por conexões desiguais de cargas mono ou bifásicas na rede elétrica, ou

de cargas trifásicas assimétricas como, por exemplo, fornos a arco. Como consequência podem provocar sobre-tensões, sobre-correntes, oscilações de potência e vibrações em máquinas girantes.

As *variações de frequência* são definidas como desvios do valor da frequência fundamental, superiores a $\pm 0,1\%$ da frequência nominal. Em geral, ocorrem devido a faltas no sistema de transmissão e distribuição, conexão de cargas de grande porte ou saída de operação de unidades geradoras do sistema elétrico. Pequenas variações de frequência podem resultar em danos severos ao gerador e ao eixo da turbina, devido às oscilações do conjugado desenvolvido. Também podem ocasionar erros em instrumentos de medida e em controladores eletrônicos, com sincronismo baseado na frequência fundamental fixa da rede.

As *variações de tensão de longa duração* são definidas como eventos com duração superior a 1 minuto e desvio da magnitude superior à faixa de tolerância do valor eficaz da tensão de referência, definida em [6]. São usualmente classificadas como:

- Sobre-tensões: quando a magnitude do valor eficaz da tensão do evento for superior ao limite de 1,1 pu. Podem ser provocadas pela saída de cargas, curto-circuitos desequilibrados, variações na compensação de reativos na rede elétrica, ajuste incorreto do “*tap*” de transformadores. Os principais efeitos são ruptura de dielétricos, perdas excessivas ou redução da vida útil de equipamentos;
- Sub-tensões: quando a magnitude do valor eficaz da tensão do evento ficar compreendido entre os limites de 0,9 pu e 0,1 pu. Podem ser provocadas por curto-circuitos, saída de banco de capacitores, partida de motores, sobrecarga dos circuitos e falta de suporte de reativos. Podem ocasionar sobre-correntes em motores, falhas de operação em equipamentos e desligamento de cargas;
- Interrupções permanentes ou contingências: quando o valor eficaz da tensão do evento ficar abaixo do limite de 0,1 pu. Ocorrem principalmente devido às faltas no SEP e são medidas em termos da Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC) e da Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC). Podem provocar o desligamento de equipamentos do consumidor.

As *variações de tensão de curta duração* (VTCD) são definidas como eventos que possuem duração inferior a 1 minuto e magnitude do valor eficaz da tensão superior e/ou inferior à faixa de tolerância de $\pm 10\%$ do valor eficaz da tensão de referência. São normalmente classificadas em função da magnitude do evento como sendo: elevações, afundamentos ou interrupções e da duração do evento como sendo: instantâneo, momentâneo ou temporário.

Para que seja possível avaliar a Qualidade de Energia Elétrica suprida é necessário registrar e analisar os distúrbios eletromagnéticos que perturbam o sistema elétrico ou pelo menos um de seus componentes. É imprescindível que os dados colhidos e armazenados sejam confiáveis e que permitam a apuração de indicadores que possibilitem analisar o desempenho do SEP e o impacto dos distúrbios sobre os diversos agentes e componentes elétricos.

Dessa forma, é imperioso estabelecer técnicas e procedimentos de medição, para assegurar uma avaliação fidedigna dos distúrbios que degradam a QEE. No Brasil, coube à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ao Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelecer padrões mínimos de desempenho do setor elétrico, visando assegurar uma energia elétrica adequada a consumidores industriais, comerciais e residenciais.

Embora as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) representem atualmente os eventos da maior importância na avaliação da Qualidade de Energia Elétrica do ponto de vista dos consumidores industriais, comerciais e domésticos, como apontam os estudos publicados nos EUA, ainda não existe um consenso quanto à melhor forma de caracterizá-las. É neste contexto que o presente trabalho se insere, ao propor recomendações, procedimentos e técnicas de monitoração, elaborando uma nova metodologia para a caracterização e análise desse tipo de distúrbio.

1.2 Variações de Tensão de Curta Duração

Como já mencionado, são definidos como VTCD (variações de tensão de curta duração) os eventos caracterizados por um desvio maior que 10% acima ou abaixo da tensão de referência, e com duração até de 1 minuto [7]. Eventos com duração superior são considerados como de

longa duração. Uma vez que a tensão eficaz pode variar significativamente durante o evento, é usual definir a magnitude da VTCD através do valor extremo (mínimo ou máximo) da tensão eficaz remanescente, enquanto perdurar o evento. A duração da VTCD, por sua vez, é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que a tensão eficaz ultrapassa a faixa de tolerância e o instante em que a mesma retorna para a faixa, conforme mostra o exemplo da Figura 1.2.1.

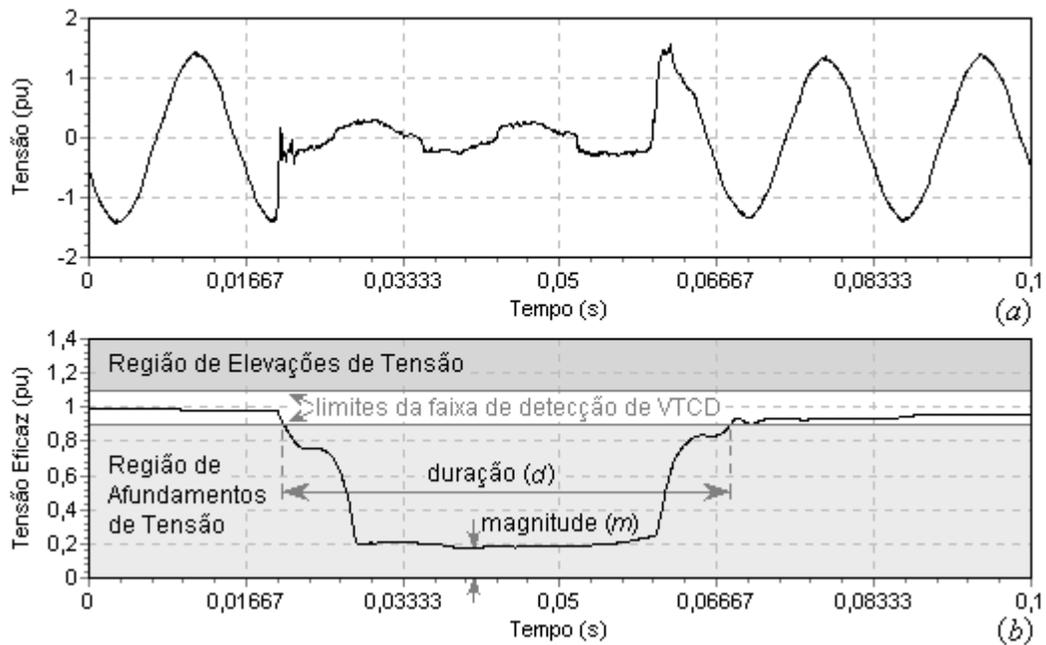


Figura 1.2.1: Distúrbio tipo VTCD: (a) forma de onda; (b) curva de valor eficaz.

1.2.1 Classificação das VTCD

Em geral, as VTCD são associadas a faltas no SEP, falhas em equipamentos de proteção, chaveamentos capacitivos ou indutivos, entrada ou saída temporária de cargas de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local do sistema.

A recomendação IEEE 1159 [4] classifica os eventos de curta duração quanto à magnitude como sendo: elevação (“swell”), afundamento (“sag”) ou interrupção (“interruption”); e quanto à duração como sendo: instantâneo, momentâneo ou temporário, conforme ilustra a Tabela 1.1, onde “c” representa a duração em ciclos e “s” representa a duração em segundos.

Tabela 1.1: Classificação das VTCD, segundo IEEE 1159.

Classificação		Magnitude (m)	Duração (d)
Instantâneo	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,8 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} < d \leq 30 \text{ c}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
Momentâneo	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,4 \text{ pu}$	$30 \text{ c} < d \leq 3 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} < d \leq 3 \text{ s}$
Temporário	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,2 \text{ pu}$	$3 \text{ s} < d \leq 60 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	

No Brasil, existe uma tendência em incluir os eventos instantâneos na categoria dos eventos momentâneos e não definir um limite superior para as elevações de tensão, conforme mostra a Tabela 1.2.

Tabela 1.2: Classificação das VTCD, segundo ANEEL e ONS [8].

Classificação		Magnitude (m)	Duração (d)
Momentâneo	Elevação (EMT)	$m > 1,1 \text{ pu}$	$1 \text{ c} < d \leq 3 \text{ s}$
	Afundamento (AMT)	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção (IMT)	$m < 0,1 \text{ pu}$	$d \leq 3 \text{ s}$
Temporário	Elevação (ETT)	$m > 1,1 \text{ pu}$	$3 \text{ s} < d \leq 60 \text{ s}$
	Afundamento (ATT)	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção (ITT)	$m < 0,1 \text{ pu}$	

As durações das três categorias da recomendação IEEE 1159 estão intencionalmente correlacionadas com o tempo de atuação da proteção e a divisão das durações recomendadas por organismos técnicos internacionais, como a UIE-DWG-2-92-D [4]. O intervalo de tempo de 30 ciclos está relacionado ao tempo de atuação dos religadores para limitar curtos-circuitos não-permanentes. Já o intervalo de tempo compreendido entre 30 ciclos e 3 segundos, está associado tipicamente ao tempo de eliminação do efeito da falta em todos os barramentos.

1.2.2 Curvas de Sensibilidade a VTCD

Equipamentos eletro-eletrônicos apresentam diferentes sensibilidades às VTCD. Para caracterizar o impacto que uma dada VTCD poderá exercer sobre os equipamentos mais sensíveis são levantadas curvas de sensibilidade por classes de cargas, de modo a caracterizar o desempenho médio dessas cargas sob condições que seriam classificadas como VTCD. Uma vez conhecidas as curvas de sensibilidade, elas podem ser utilizadas para identificar os locais onde ocorre maior exposição das cargas a esse tipo de evento e, portanto, tem maior chance de causar interferência em processos produtivos. Esta informação pode ser utilizada, adicionalmente às características de magnitude e duração do evento, para avaliar o desempenho do sistema elétrico, em função da vulnerabilidade de uma carga específica.

A Figura 1.2.2 mostra a curva de sensibilidade de computadores a eventos, conhecida como CBEMA (“Computer Business Equipment Manufacturers Association”) [9], que foi desenvolvida para descrever a tolerância típica de diferentes computadores a variações de tensão tanto em magnitude quanto em duração do evento.

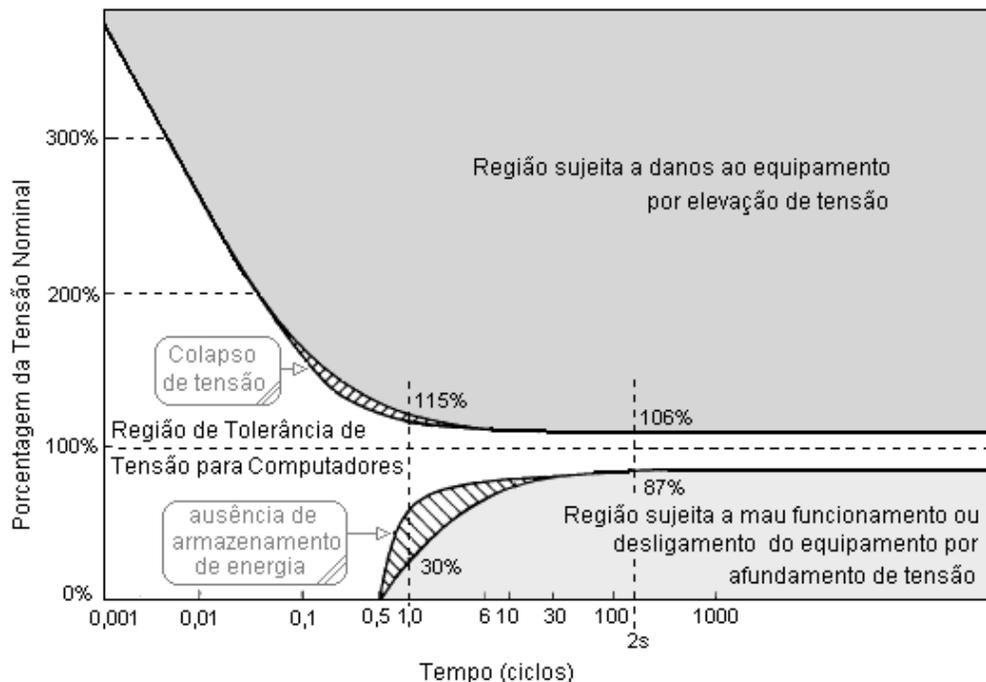


Figura 1.2.2: Curva de sensibilidade para computadores (CBEMA).

Dentro dos limites da região de tolerância é esperado que um computador opere de forma segura e caso o evento viole os limites dessa região poderá haver mau funcionamento ou danos ao equipamento [10].

A curva CBEMA foi proposta originalmente em 1974, e já sofreu modificações ao longo do tempo. Atualmente há uma tendência em substituí-la pela curva ITIC (“Information Technology Industry Council”), conforme ilustra a Figura 1.2.3, que engloba os Equipamentos de Tecnologia de Informação (ITE – “Information Technology Equipment”) [11]. Cabe ressaltar que a curva ITIC não é uma especificação para projeto de equipamentos, mas apenas uma curva-guia que descreve o comportamento típico, da maioria dos equipamentos do tipo ITE, face à tensão de entrada.

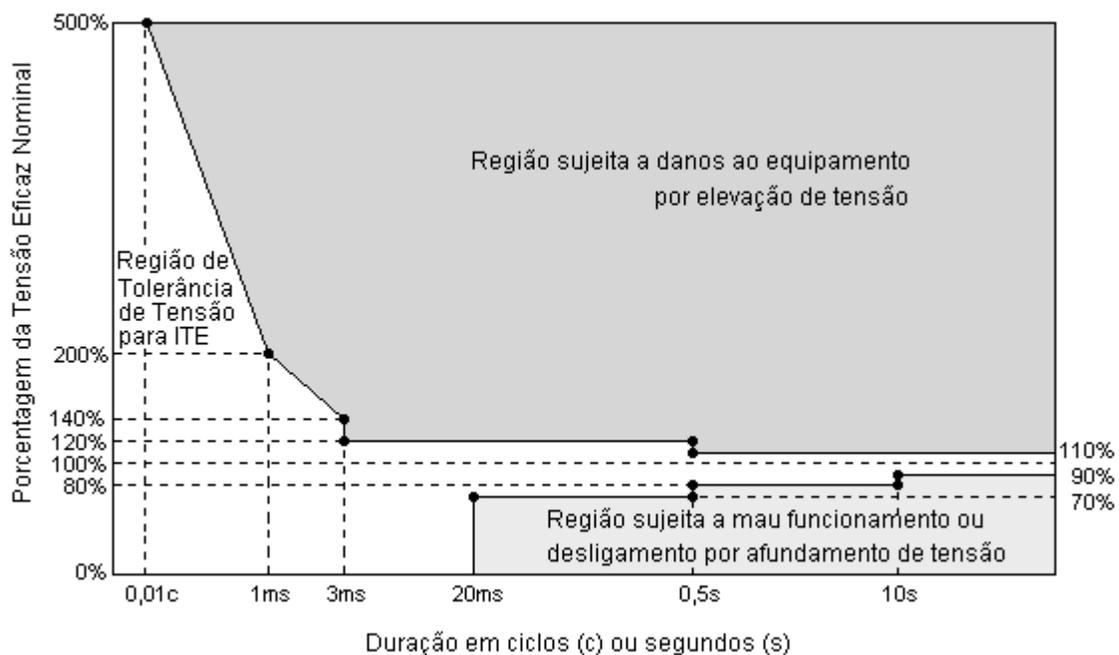


Figura 1.2.3: Curva de sensibilidade para equipamentos de informação (ITIC).

Para fins de ilustração da utilização da curva guia, considere o evento mostrado na Figura 1.2.1, que possui magnitude de 0,17 pu e duração de 47,46 ms. Esboçando os parâmetros de magnitude e duração do evento sobre a curva ITIC, conforme detalhado na Figura 1.2.4, constata-se que um equipamento de informação poderia sofrer mau funcionamento ou desligamento devido a este distúrbio.

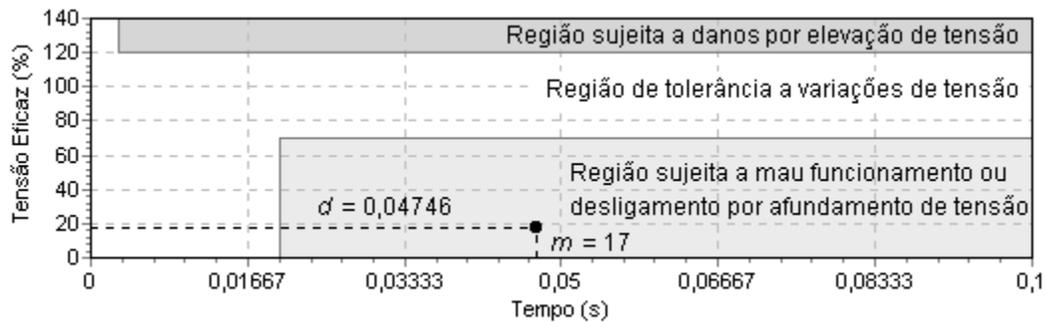


Figura 1.2.4: Conformidade do evento da Fig. 1.2.1 com a curva ITIC.

As curvas ITIC e CBEMA podem levar a falsas conclusões sobre o impacto do evento em um determinado equipamento, se forem usadas para avaliar a severidade de eventos em equipamentos que não sejam os de tecnologia de informação e computadores, respectivamente; pois estas curvas não se aplicam a todos os tipos de cargas sensíveis [12]. Isto vale particularmente para cargas que são sensíveis ao valor de pico de tensão e não ao valor eficaz, como por exemplo, cargas de corrente contínua alimentadas por pontes retificadoras.

1.2.3 Frequência dos Distúrbios de VTCD

A frequência dos distúrbios está relacionada com o número de ocorrências de violações da região de tolerância a variações de tensão da curva ITIC ao longo de um período de tempo, como por exemplo, um ano de monitoração de um barramento.

A Figura 1.2.5 ilustra a distribuição de distúrbios na fase A de um sistema elétrico, com duração inferior a 0,1 segundos, observados durante um certo período de medição, em um dado barramento.

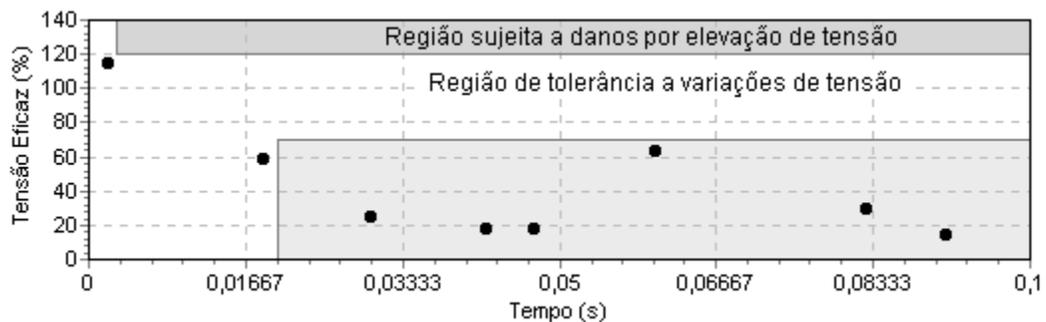


Figura 1.2.5: Eventos ocorridos durante um período de medição.

É possível observar que do total de 8 eventos, seis violam o limite inferior da curva ITIC. Comparando-se as incidências de eventos nas demais barras do sistema elétrico, torna-se possível estimar a vulnerabilidade de cada uma das barras da rede elétrica. Pode-se dessa forma mapear as regiões com maior deficiência na qualidade do suprimento de energia e que, portanto, necessitam de maiores investimentos para atingir um padrão uniforme de atendimento.

1.3 Motivação e Objetivos do Trabalho

De acordo com as recomendações atuais do IEEE, as principais metodologias de análise de VTCD baseiam suas técnicas para caracterização do evento apenas nos parâmetros de magnitude (mínima ou máxima) e de duração do distúrbio. No entanto, são cada vez mais incisivas as críticas a tais métodos, devido às limitações e simplificações inerentes. Em [13], o autor ressalta que utilizar somente estes dois parâmetros para caracterizar os eventos é insuficiente para avaliar o impacto do evento sobre cargas sensíveis.

Fundamentado nestas limitações, o presente trabalho buscou uma nova metodologia para caracterização de eventos e avaliação da severidade das VTCD sobre cargas sensíveis e sobre o desempenho do Sistema Elétrico de Potência. Para alcançar tais objetivos são tratados os seguintes tópicos ao longo deste trabalho:

- Estabelecimento de procedimentos adequados para a monitoração de eventos de curta duração;
- Desenvolvimento de uma nova metodologia para caracterização das variações de tensão de curta duração;
- Formulação de indicadores de eventos de curta duração que possam ser utilizados para estimar o impacto dos eventos sobre cargas sensíveis e avaliar a sua interação com o sistema elétrico;
- Análise de registros de medição e de simulação de VTCD na rede elétrica.

1.4 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 trata de técnicas para a medição das Variações de Tensão de Curta Duração e para o armazenamento dos registros de monitoração e/ou simulação de eventos.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão das principais metodologias de análise de eventos e a proposição de uma nova forma para caracterização e análise de VTCD.

No Capítulo 4 aplica-se a metodologia proposta de análise de VTCD a um banco de dados, contendo eventos simulados em uma rede elétrica fictícia para verificar o mecanismo de propagação de eventos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas nessa dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

Os Apêndices A e B apresentam curvas que ilustram a caracterização de eventos que foram utilizadas para a avaliação do desempenho do sistema elétrico no Capítulo 3 e do mecanismo de propagação das VTCD no Capítulo 4.

Capítulo 2

Processo de Medição de VTCD

2.1 Introdução

A investigação de indicadores que permitam avaliar a severidade dos distúrbios eletromagnéticos que degradam a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) no Sistema Elétrico de Potência (SEP) não é uma tarefa simples devido à multiplicidade de perturbações possíveis de ocorrer e devido às diferentes formas que os seus efeitos podem se manifestar sobre os componentes do sistema elétrico e afetar os usuários dessa energia. Para realizar as análises necessárias à obtenção de indicadores precisos sobre a QEE é essencial que os registros coletados pelos instrumentos de medição sejam confiáveis.

A escolha incorreta do filtro, da taxa de amostragem ou da resolução do conversor A/D do medidor, poderá comprometer a credibilidade dos registros dos distúrbios da mesma forma que o processamento digital inadequado dos sinais de tensão ou de corrente pode acarretar em análises equivocadas sobre a severidade do evento em um equipamento e, conseqüentemente, sobre a

avaliação do desempenho do SEP.

Por essas razões, são necessários procedimentos apropriados para a monitoração da QEE na rede elétrica. A Figura 2.1.1 ilustra um esquema básico de monitoramento da qualidade de energia elétrica em um ponto do sistema elétrico e o envio dos eventos registrados para um sistema gerenciador de banco de dados, onde serão analisados os registros de eventos.

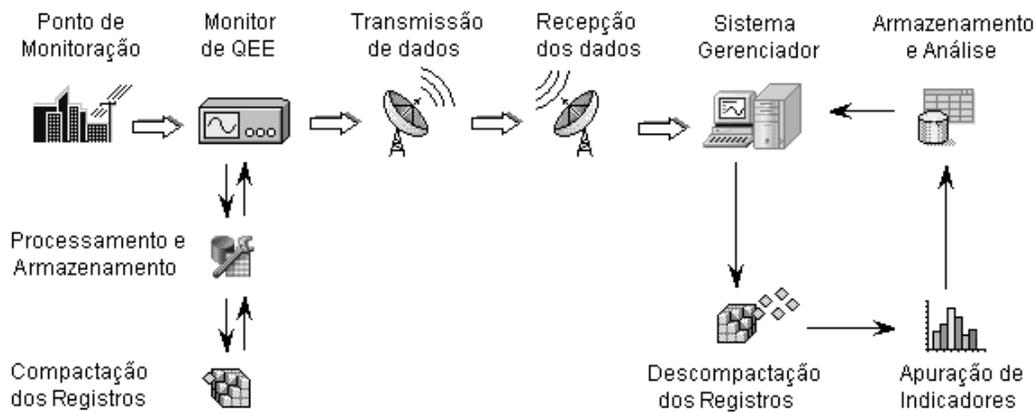


Figura 2.1.1: Esquema de Monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica.

Este trabalho não abordará assuntos como a escolha do ponto de monitoração, conexão do equipamento, condicionamento de sinais analógicos de tensão e transmissão de dados, pois para estes temas cabem pesquisas específicas a serem consideradas em trabalhos futuros.

2.2 Valor Eficaz da Tensão

Tradicionalmente emprega-se o valor eficaz da tensão para a caracterização das VTCD, embora pudesse ser feita através da tensão complexa [14], ou da amplitude da tensão utilizando um detector baseado em PLL (“Phase Locked Loop”) [15].

O valor eficaz da tensão alternada periódica é definido como o valor equivalente de tensão contínua que teria a mesma dissipação de potência média em uma carga unitária puramente resistiva.

Para um sinal de tensão periódico qualquer $v(t)$, de período fundamental T , a tensão eficaz

(V_{ef}) é definida como:

$$V_{ef}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t).dt} . \quad (2.2.1)$$

2.2.1 Técnicas de Processamento Digital do Sinal de Tensão

No caso de processamento digital, a tensão eficaz de uma forma de onda periódica amostrada pode ser avaliada sobre uma janela de integração e de média, contendo um ou mais ciclos de amostras do sinal na frequência fundamental, tendo seu valor atualizado a cada nova amostra (atualização contínua) ou a cada múltiplo inteiro de ciclos de amostras (atualização discreta).

Para uma janela de atualização discreta j , com N amostras por período, o valor eficaz da tensão pode ter sua expressão (2.2.1) reescrita como:

$$V_{ef}(j) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} v^2[jN - n]} . \quad (2.2.2)$$

De forma análoga, para uma janela de atualização contínua, contendo N amostras por período, o valor eficaz no instante de amostragem k , pode ser expresso por:

$$V_{ef}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} v^2[k - n]} . \quad (2.2.3)$$

A Figura 2.2.1 ilustra o diagrama de blocos esquemático para o cálculo do valor eficaz ($V_{ef}[k]$) para uma janela de atualização contínua.

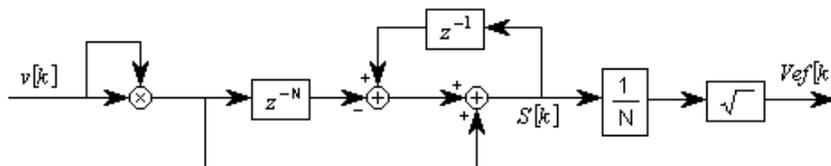


Figura 2.2.1: Diagrama de blocos esquemático para o cálculo do valor eficaz.

Dessa forma, é possível escrever a equação do cálculo do valor eficaz para uma janela de atualização contínua como:

$$V_{ef}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot (v^2[k] - v^2[k-N] + S[k-1])}. \quad (2.2.4)$$

As amostras de tensão ($v[k]$) da janela têm seus valores elevados ao quadrado individualmente e em seguida somados ($S[k]$). O valor quadrático da amostra mais antiga do somatório é excluído ($v^2[k-N]$) e o novo valor quadrático ($v^2[k]$) é inserido, atualizando o valor do somatório e conseqüentemente o valor eficaz da amostra.

Uma das possíveis maneiras de se implementar o armazenamento das N amostras de valores quadráticos da janela da equação (2.2.4) seria através de um vetor deslizante do tipo FIFO (“First In – First Out”), conforme ilustra o desenho esquemático da Figura 2.2.2; onde é possível observar que as amostras são deslocadas da direita para a esquerda, isto é, exclui-se a amostra mais antiga e incorpora-se uma nova.

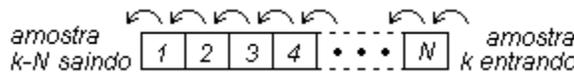


Figura 2.2.2: Esquema de armazenamento de amostras em vetor deslizante FIFO.

De forma mais otimizada, as amostras de valor quadrático podem ser armazenadas em uma lista circular, conforme mostra a Figura 2.2.3. A amostra nova é inserida no lugar da amostra mais antiga, evitando-se o processo de deslocamento das demais amostras [16]. A posição onde será inserida a amostra é calculada a partir do resto inteiro da divisão da amostra atual (k) pelo número total de amostras por ciclo (N), que foi representada na figura por “ k_{mod} ”.

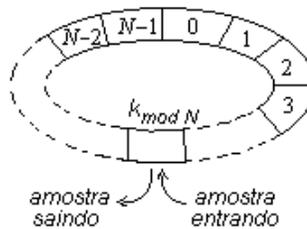


Figura 2.2.3: Esquema de armazenamento de amostras em lista circular.

Quando o sinal torna-se não periódico, como é o caso das VTCD, o valor eficaz perde seu sentido convencional, resultando em erros de avaliação dos indicadores para VTCD. Além disso, como a tensão eficaz é uma média quadrática obtida continuamente sobre um período da onda fundamental, a detecção de eventos de curta duração pelo valor eficaz sofre atrasos, que devem ser considerados para fins de análise ou de controle.

Uma forma de reduzir esses erros consiste em utilizar janelas de integração utilizando meio ciclo de amostras para o cálculo do valor eficaz. É importante ressaltar que todas as definições de cálculo do valor eficaz para a janela de um ciclo são válidas para a apuração do valor eficaz para a janela de meio ciclo.

2.2.2 Avaliação das Técnicas de Cálculo do Valor Eficaz

A parte (b) da Figura 2.2.4 ilustra um exemplo comparativo das técnicas de cálculo do valor eficaz aplicados a um distúrbio de tensão mostrado na parte (a).

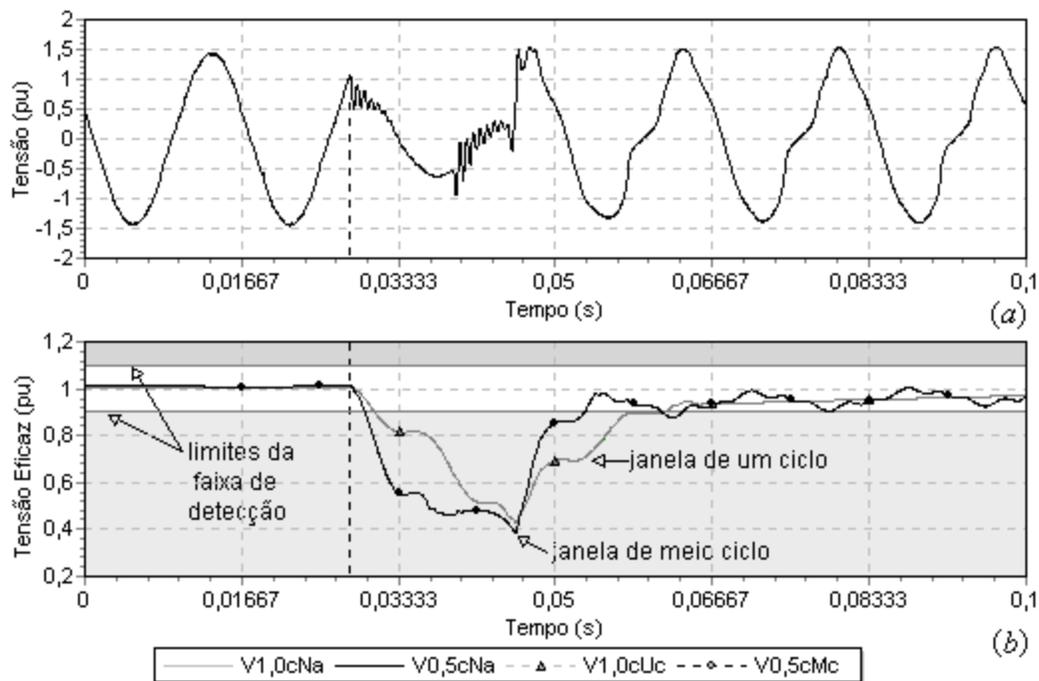


Figura 2.2.4: Curvas de: (a) forma de onda; (b) técnicas de apuração da tensão eficaz.

Foram utilizados os seguintes protocolos de cálculo do valor eficaz [17]:

- Janela de um ciclo, atualizada a cada nova amostra (V1,0cNa);
- Janela de meio ciclo, atualizada a cada nova amostra (V0,5cNa);
- Janela de um ciclo, atualizado a cada ciclo (V1,0cUc);
- Janela de meio ciclo, atualizada a cada meio ciclo (V0,5cMc).

A Figura 2.2.5 mostra em detalhes a curva de valor eficaz da tensão de janela de meio ciclo atualizada a cada nova amostra (curva contínua) e as amostras de valor eficaz da tensão de janela de meio ciclo atualizada a cada a cada meio ciclo (pontos em destaque).

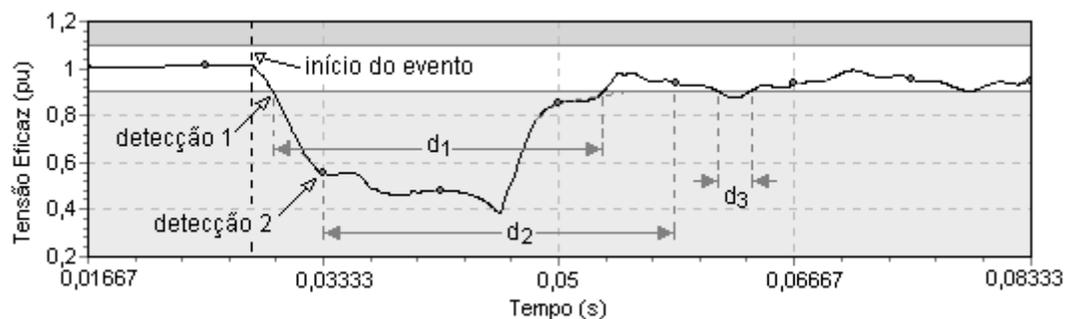


Figura 2.2.5: Comparação entre as técnicas de atualização do valor eficaz.

É possível observar que existe um tempo de atraso na detecção do distúrbio bem como diferenças de magnitude e de duração do evento para cada um dos métodos de atualização do cálculo do valor eficaz.

As curvas do valor eficaz de atualização discreta podem ser interpretadas como uma sub-amostragem das curvas de valor eficaz atualizada continuamente. A detecção de eventos através do cálculo do valor eficaz utilizando a técnica de atualização discreta, na maioria das vezes, sofre retardos se comparado com a técnica de atualização contínua. Eventos que possuem duração inferior ou próxima ao período de integração utilizado na janela de cálculo do valor eficaz apresentam variações significativas nos parâmetros de magnitude e de duração do evento comparando-se as técnicas de atualização do valor eficaz.

Assimetrias de meia onda provocam oscilações na curva de valor eficaz da janela de meio

ciclo, devido ao período de integração do meio ciclo anterior ser diferente do meio ciclo atual. Essas oscilações podem causar reincidências de violação da faixa de detecção de eventos, conforme ilustra o exemplo da Figura 2.2.5, onde a duração do evento utilizando a janela de meio ciclo atualizada a cada amostra corresponde à soma das durações d_1 e d_3 .

A Figura 2.2.6-(a) mostra, em detalhes, as curvas de valor eficaz de janela de meio ciclo e de janela de um ciclo atualizadas continuamente. É possível observar que o valor eficaz de janela de meio ciclo é mais sensível a perturbações na forma de onda do que o valor eficaz de janela de um ciclo, em decorrência de seu período de integração ser menor.

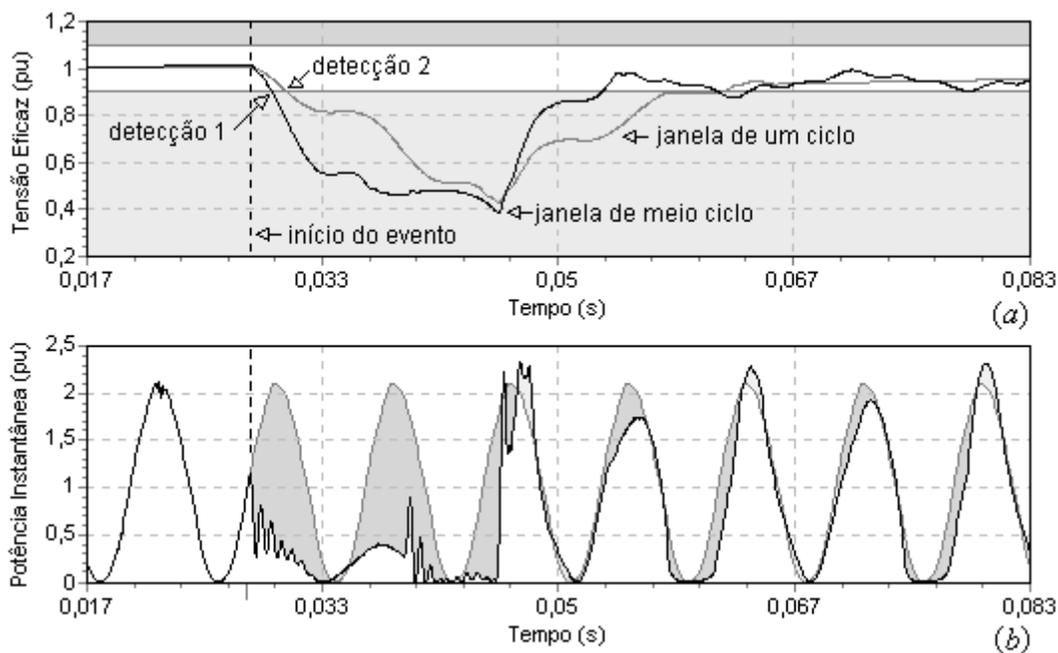


Figura 2.2.6: Curvas de: (a) tensão eficaz; (b) potência instantânea do evento.

A curva de valor eficaz da janela de meio ciclo, atualizada a cada nova amostra, descreve mais fielmente a perturbação na energia fornecida pelo sistema durante o evento, conforme ilustra a Figura 2.2.6-(b). A região hachurada mais escura do gráfico representa a energia não entregue pelo sistema durante o evento, enquanto a região mais clara representa a energia entregue em excesso pela fonte.

É possível constatar ainda que existe uma variação da energia não entregue pelo sistema,

o que justifica as oscilações na curva do valor eficaz de meio ciclo atualizado a cada nova amostra.

Na literatura, são relatados “picos de transição” que surgem em função do deslocamento do ângulo de fase durante o evento [17], podendo provocar erros na detecção do distúrbio elétrico ou na avaliação de sua magnitude, sendo um pouco mais intenso em janelas de meio ciclo do que em janelas de um ciclo.

As variações de frequência na componente fundamental do sinal de tensão podem resultar em erros no cálculo do valor eficaz da tensão, em função deste período ser diferente do intervalo de tempo (amostras) utilizada na janela de avaliação da tensão eficaz [18]. Entretanto, existem indicadores apropriados para apurar as variações de frequência no sistema elétrico.

2.3 Detecção de VTCD

Define-se como início de uma VTCD o instante em que pelo menos uma das fases viola a faixa de detecção do evento e o seu final é assumido quando a última das fases retorna para dentro dessa faixa. Entretanto, esta abordagem não contempla eventos que violam diversas vezes seguidas a faixa de detecção e que possuem a mesma causa.

A Figura 2.3.1 mostra um exemplo de detecção múltipla de violações de um evento, utilizando a faixa de $\pm 10\%$ do valor eficaz da tensão de referência. É possível constatar que existe um intervalo de tempo de atraso para a detecção (*ad*) do evento e que o mesmo viola três vezes o limite de detecção. Esse problema será tratado, mais adiante, através da técnica de agregação por janela de pós-evento.

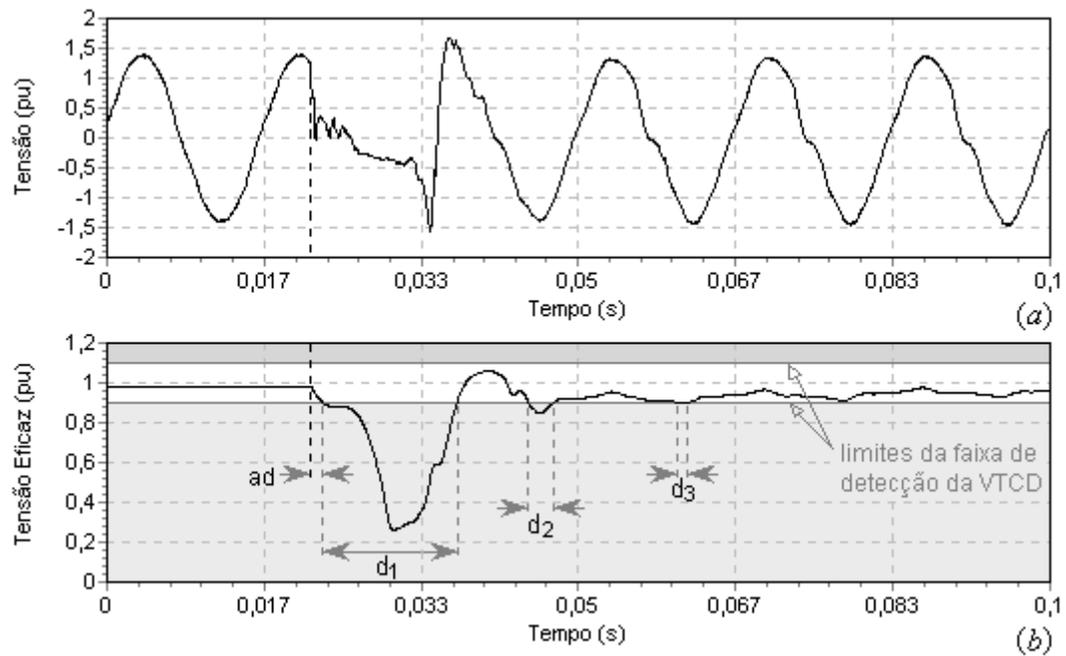


Figura 2.3.1: Exemplo de detecção de VTCD: (a) forma de onda; (b) tensão eficaz.

2.3.1 Faixas de Histerese

A metodologia usual emprega faixas de histerese para a captura de distúrbios tipo VTCD com o objetivo de dessensibilizar o detector de eventos contra ruídos na rede elétrica [16], conforme ilustra a Figura 2.3.2 que é a aplicação dos limites de histerese ao evento da Figura 2.3.1.

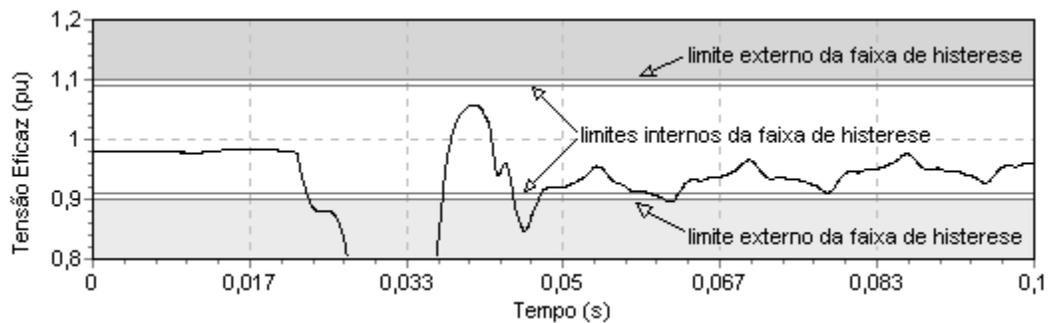


Figura 2.3.2: Exemplo de aplicação de limites de faixa de histerese.

Assim, o início da VTCD é definido como o instante em que pelo menos uma das fases da tensão eficaz viola o limite externo, enquanto o final do evento é definido como o instante em que todas as fases retornam para a faixa do limite interno. Entretanto, essa técnica além de resultar em um esforço computacional maior, não garante a eliminação de interferência devido a “ruídos” do sinal monitorado.

2.3.2 Agregação Temporal de Eventos

No exemplo da Figura 2.3.1, observa-se que ocorreram três violações da faixa permissível de variação de tensão. Pela definição das Variações de Tensão de Curta Duração, os registros dessas violações seriam armazenados como três eventos distintos, embora correspondam somente a uma VTCD.

Para contornar esta limitação, pode-se armazenar temporariamente as amostras de tensão, ou informação equivalente, durante um intervalo de tempo após a tensão eficaz de todas as fases retornarem para dentro da faixa de detecção de eventos. Esse artifício é denominado de “buffer” (ou janela) de pós-evento e, caso haja uma nova violação da faixa dentro desse período, incorpora-se ao evento inicial a informação armazenada no “buffer” de pós-evento e reinicia-se o procedimento de tratamento do distúrbio até que não haja novas violações dentro desse intervalo de tempo ou até que a duração da VTCD ultrapasse 1 minuto, que é o tempo máximo considerado para eventos de curta duração.

Após a análise de diversos registros de medição de VTCD, ao longo de um ano de observação, em barras de alta tensão de empresas de energia elétrica brasileiras, foi estabelecido um intervalo de tempo de 32 ciclos como ajuste de tempo para o período de pós-evento, pois além de atenuar o problema da reincidência de violação da faixa de detecção por um mesmo evento, serve como uma possível janela para a Transformada Rápida de Fourier (FFT) na avaliação de distúrbios em regime permanente.

Adicionalmente, um “buffer” pré-evento pode ser utilizado para armazenar a informação das ondas antes da ocorrência do evento. Caso se esteja guardando a forma de onda da tensão,

este artifício permitirá dirimir o problema de atraso de detecção dos distúrbios, tornando possível a captura de toda a forma de onda do evento. Empiricamente, o intervalo de dois ciclos é suficiente para armazenar a informação do pré-evento.

Uma janela deslizante do tipo FIFO poderia ser utilizada para armazenar a informação do pré-evento, no entanto, a lista circular é uma opção mais otimizada, embora apresente o inconveniente da necessidade de armazenar o ponteiro do instante da detecção do evento.

2.3.3 Duração do Evento

Ao se adotar a técnica de agregação temporal de eventos torna-se necessário definir uma nova forma para caracterizar a duração dos distúrbios tipo VTCD.

Na Figura 2.3.1-(b) o intervalo de tempo em que a tensão eficaz permaneceu abaixo do limite de 90% corresponde à soma das durações das violações das faixas ($d_1 + d_2 + d_3$). Dessa forma, a duração de uma VTCD seria melhor definida como o somatório dos intervalos de tempo em que a tensão eficaz violou a faixa de limites de detecção do evento.

2.3.4 Tensão de Referência

Não existe um consenso sobre qual deva ser a tensão de referência a ser utilizada na monitoração e avaliação dos distúrbios eletromagnéticos na rede elétrica [8]. Os medidores mais difundidos no mercado permitem ajustá-la como sendo: a tensão nominal, a tensão operativa (ajustada por contrato) ou a tensão pré-falta.

A tensão pré-falta não fornece uma avaliação adequada da severidade das VTCD sobre as cargas, pois não permite avaliar criteriosamente a frequência de danos a cargas conectadas à rede elétrica [8], embora a corrente pré-falta seja uma informação útil para a monitoração de eventos pela corrente elétrica.

Por outro lado, a tensão nominal permite homogeneizar os diversos níveis de tensão do

Sistema Elétrico de Potência e avaliar o impacto das VTCD sobre os equipamentos, exceto nos casos em que a tensão operativa seja diferente da nominal. Um simples ajuste no “tap” do transformador permite que o consumidor opere na tensão nominal na média, ou baixa tensão.

Assim, para a avaliação da severidade dos eventos de curta duração é mais sensato adotar a tensão operativa como a tensão de referência, quando diferente da nominal, pois o principal objetivo da monitoração da qualidade de energia elétrica é o de avaliar a interação das cargas com a rede elétrica, com o objetivo de identificar as possíveis causas e efeitos dos distúrbios detectados.

2.4 Histogramas de Frequência por Nível

Embora não usual, nem descrito na literatura, a análise de VTCD empregando o histograma de frequências por nível será aqui descrito como uma alternativa a ser considerada seriamente em sistemas digitais de monitoramento.

A codificação dos registros de medição via histogramas de frequência por nível [19] permite extrair os principais indicadores estatísticos relacionados aos eventos sem perda relevante de informações [20] que permitam avaliar a severidade das VTCD.

Para ilustrar a metodologia de construção do histograma de frequências por nível de um evento, apresenta-se a Figura 2.4.1 que mostra em (a) a forma de onda do evento e em (b) a curva de valor eficaz de janela de meio ciclo, atualizado continuamente. Os pontos em destaque nesta curva representam as amostras de tensão eficaz da janela de meio ciclo atualizada discretamente.

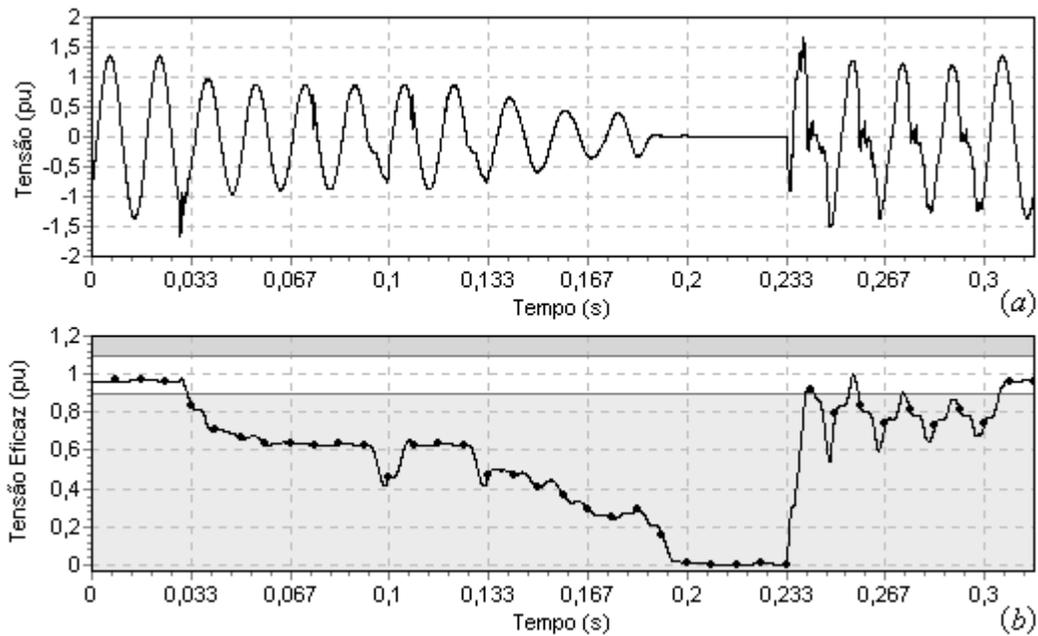


Figura 2.4.1: Curvas: (a) forma de onda; (b) tensão eficaz do evento.

Os níveis de tensão eficaz podem ser divididos em faixas de variação de tensão (classes) e as amostras da curva de tensão eficaz podem ser agrupadas conforme sua incidência dentro dessas faixas de tensão. Para facilitar a interpretação da distribuição das amostras de valor eficaz no histograma de freqüências por nível, pode-se utilizar o artifício de corresponder cada classe a uma faixa percentual de tensão, aqui denominado, nível de tensão.

A distribuição das amostras de tensão eficaz do distúrbio pode ser automatizada utilizando-se um processo de conversão de escalas, conforme ilustra a Figura 2.4.2.

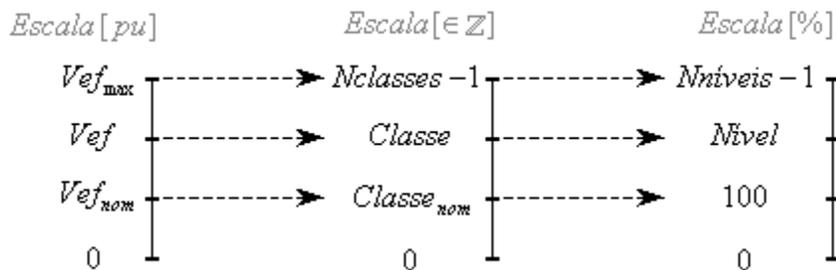


Figura 2.4.2: Esquema de classificação de amostras.

Para converter o valor eficaz da tensão na classe de pertinência utiliza-se a expressão:

$$Classe = (\text{inteiro}) \left[\frac{V_{ef}}{V_{ef_{max}}} \cdot (N_{classes} - 1) \right]. \quad (2.4.1)$$

Caso a tensão eficaz ultrapasse o valor máximo pré-fixado ($V_{ef_{max}}$), ela tem sua magnitude automaticamente limitada em $V_{ef_{max}}$. Por essa razão, este parâmetro e o número de classes definirão a resolução do histograma de frequências por nível, que é dado por:

$$\text{resolução}(\%) = \frac{V_{ef_{max}}}{N_{classes} - 1}. \quad (2.4.2)$$

A Tabela 2.1 ilustra a classificação das amostras da curva de tensão eficaz da Figura 2.4.1 em faixas de variação de tensão de 0,1 pu.

Tabela 2.1: Tabela de frequências de observação por nível.

Classe	Nível (%)	Faixa (pu)	Nº Obs.	Classe	Nível (%)	Faixa (pu)	Nº Obs.
0	[0; 10[	[0,0; 0,1[	5	6	[60; 70[	[0,6; 0,7[	9
1	[10; 20[	[0,1; 0,2[	1	7	[70; 80[	[0,7; 0,8[	5
2	[20; 30[	[0,2; 0,3[	3	8	[80; 90[	[0,8; 0,9[	4
3	[30; 40[	[0,3; 0,4[	1	9	[90; 100[	[0,9; 1,0[	6
4	[40; 50[	[0,4; 0,5[	4	10	[100; 110[	[1,0; 1,1[	0
5	[50; 60[	[0,5; 0,6[	0	11	[110; 120[	[1,1; 1,2[	0

Uma metodologia adotada neste trabalho consiste em expressar as faixas de tensão, ou níveis, em intervalos fechados à esquerda ([) e abertos à direita ([), ou seja, limite inferior de tensão pertence à faixa e o superior não.

A disposição gráfica que melhor representa o conjunto de dados da Tabela 2.1 é o Histogramas de Frequência por Nível, conforme ilustra a Figura 2.4.3. A vantagem de se utilizar esta metodologia reside na facilidade de classificar rapidamente o evento, após converter a informação da frequência de observações no valor equivalente em ciclos, ou segundos.

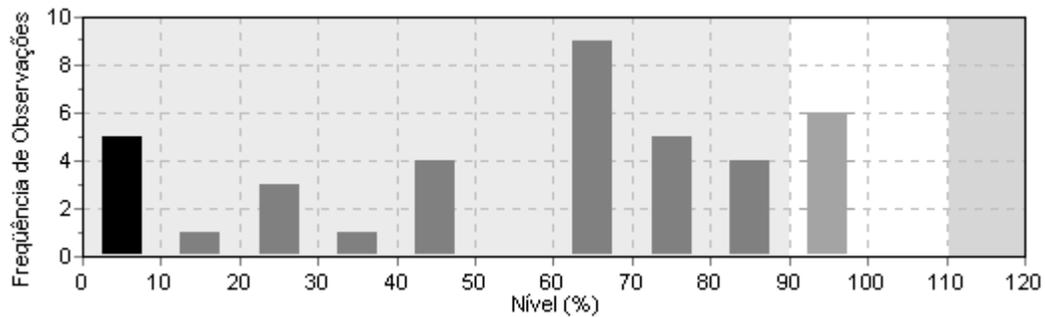


Figura 2.4.3: Histograma de Frequência de Nível.

Neste exemplo, percebe-se que 32 amostras (0,26667 segundos) ficaram abaixo de 90% (nível 90) da tensão nominal, sendo que dessas, 5 amostras (0,041667 segundos) ficaram abaixo de 10% da tensão nominal; o que permite classificar o evento como uma Interrupção Momentânea de Tensão (IMT). Neste caso, só é possível afirmar que a magnitude do evento é inferior a 10% da tensão nominal.

O aumento do número de classes permite extrair com maior precisão os parâmetros de magnitude e de duração do evento no histograma de freqüências. A Figura 2.4.4 ilustra o histograma da Figura 2.4.3 com uma resolução de 1%, de onde é possível extrair que a magnitude mínima do evento é 0 pu e sua duração é 0,26667 segundos.

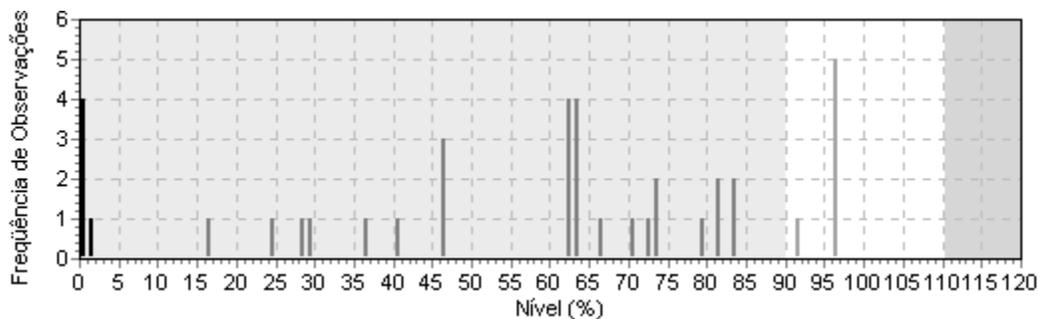


Figura 2.4.4: Histograma de Frequência por Nível.

A técnica de atualização contínua do valor eficaz da tensão permite extrair dos histogramas indicadores mais precisos em relação ao evento de curta duração. Para ilustrar esta informação, considere o evento da Figura 2.4.1, o qual possui 256 amostras por ciclo. Utilizando a resolução de 1% e a distribuição das amostras da curva de tensão eficaz do evento é possível

construir o histograma mostrado na Figura 2.4.5; de onde é possível obter que a magnitude do evento é de 0 pu e sua duração é de 0,26621 segundos.

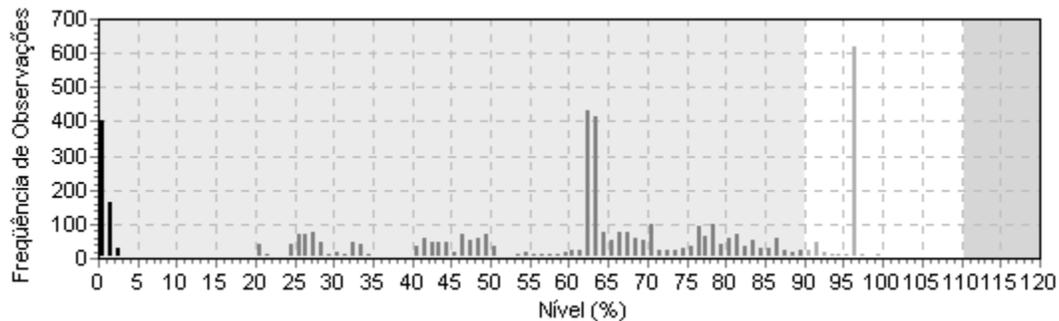


Figura 2.4.5: Histograma de Frequências por Nível.

2.5 Armazenamento de Dados

Uma estrutura bem projetada de armazenamento dos registros de medição possibilita reduzir os custos no sistema de monitoração sem perda significativa de informações. Se for necessário obter indicadores que possibilitem averiguar a severidade das VTCD sobre os equipamentos, analisar o desempenho da rede elétrica e verificar a propagação dos eventos na rede, pode-se simplesmente armazenar o histograma de frequências do evento, conforme será visto nos próximos capítulos. Por outro lado, se for necessário identificar a origem e a causa do distúrbio com precisão, deve-se armazenar não somente as formas de onda de tensão, mas também as formas de onda de corrente do evento.

Para realizar as análises a partir do histograma dos eventos, os dados relativos ao histograma de frequências podem ser obtidos, em tempo real, em unidades locais de medição e posteriormente enviados para um Sistema Gerenciador de Banco de Dados Relacional, que processa automaticamente os indicadores e organiza as VTCD conforme o grau de severidade do evento ou do instante de captura do mesmo.

2.5.1 Armazenamento em Arquivos

Os medidores tradicionais de Qualidade de Energia Elétrica em geral registram juntamente com cada amostra de tensão das três fases, a data e o horário da amostragem. Contudo, esta prática resulta em uma redundância desnecessária de informação, pois considerando que o intervalo de amostragem é constante, conhecido e não sujeito a falhas, basta armazenar no nome do arquivo, ou em seu cabeçalho, a data e o horário de início do evento. Assim, os registros dos valores das amostras das tensões trifásicas ficam organizados seqüencialmente, na forma de uma tabela com 3 colunas contendo o valor da amostra de tensão para cada uma das fases.

A mesma técnica pode ser adotada no armazenamento do histograma de freqüências por nível, organizando os registros em função da classe. Entretanto, é necessário compatibilizar os histogramas de todos os pontos monitorados para que seja possível avaliar adequadamente o desempenho do SEP. Assim, é necessário que os histogramas sejam construídos com o mesmo número de amostras de tensão eficaz por ciclo, mesma resolução e o mesmo valor de excursão máxima de tensão eficaz.

2.5.2 Banco de Dados Relacional

A vantagem de armazenar os registros de VTCD em um sistema gerenciador de banco de dados reside na eficiência em organizar os dados segundo o grau de severidade ou do instante de detecção do evento, descobrir correlações entre as VTCD e avaliar a evolução dos indicadores ao longo de um período de tempo.

De posse desse banco de dados e de informações sobre o mau funcionamento e a danificação de um determinado equipamento é possível construir a curva de sensibilidade do mesmo. E ainda, alimentando esse banco de dados com as formas de onda registradas e as possíveis causas dos distúrbios, é possível treinar uma rede neural para automatizar os diagnósticos das causas de uma determinada VTCD.

É importante ressaltar que caso se esteja guardando a forma de onda de tensão do evento, a mesma deve ficar armazenada em um arquivo binário, de preferência, compactado, ao invés de inseri-lo em um banco de dados. Notar que esta opção, além de não inviabilizar o acesso aos registros de medição por um programa computacional, permite realizar mais agilmente correlações entre os dados guardados.

2.5.3 Compactação de Dados

A compactação de dados pode ser lógica ou física. A compressão lógica consiste em estabelecer procedimentos apropriados para o armazenamento dos registros de medição, enquanto que a compressão física consiste em comprimir os dados de forma a reduzir a redundância de informações e permitir a sua posterior recuperação. Esta pode ser de dois tipos: com perda ou sem perda de informação no sinal reconstruído.

Um método simples de compressão lógica, aplicado usualmente para diminuir o tamanho dos arquivos dos registros de medição e diminuir o tempo de acesso aos dados, consiste em gravar os arquivos em formato binário que ao invés do formato texto não necessita armazenar os pares retorno de carro (CR) e preenchimento de linha (LF) para realizar a tradução de caracteres [21].

Em geral, as técnicas de compressão física de arquivos, como os de áudio, podem ser utilizadas para compactar os registros de medição do Sistema Elétrico de Potência. A vantagem da compactação de dados com perdas reside, em princípio, na maior compressão dos arquivos, enquanto que a sem perdas reside na fidelidade do sinal reconstruído. A Transformada de Wavelet [22], por exemplo, tem sido aplicada como um método de compactação de dados com perdas, obtendo razões de compressão superior a 80% do sinal original. Como método de compactação de dados sem perdas, os mais utilizados são: LZ (Lempel-Ziv) e suas variações, codificação aritmética e Huffman.

Dessa forma, é possível reduzir custos tanto com o armazenamento quanto com a transmissão de dados. Entretanto, existe a necessidade de aprofundar os estudos dessas técnicas

de compressão para avaliar sua eficácia com relação aos mais diferentes tipos de registros de eventos de curta duração, adaptando-as para o SEP.

2.6 Conclusões

É imprescindível definir os tipos de análises necessárias para que seja possível estabelecer precisamente a estrutura de captura, processamento e armazenamento dos registros de Variações de Tensão de Curta Duração.

O valor eficaz da tensão pode ser calculado sobre uma janela contendo um múltiplo inteiro de meio-ciclos de amostras do sinal na frequência fundamental e pode ter seu valor atualizado continuamente ou discretamente.

A lista circular apresenta como vantagem uma redução no tempo de processamento para a avaliação do valor eficaz atualizado continuamente em relação ao vetor deslizante do tipo FIFO.

O artifício do pós-evento em um “buffer” permite a agregação temporal de eventos, enquanto o pré-evento reduz a perda de informação que poderia haver em função do atraso na detecção de eventos.

A tensão operativa deve ser adotada como a tensão de referência, pois a mesma permite uma avaliação mais precisa do impacto da VTCD sobre as cargas sensíveis e, conseqüentemente, do desempenho do sistema elétrico.

A disposição gráfica que melhor representa um conjunto de dados distribuídos em função de faixas de variação de tensão é o histograma de frequências por nível. Quanto maior sua resolução e número de amostras utilizadas para construí-lo, mais precisa é a informação que ele armazena. Entretanto, a codificação dos registros de medição das VTCD não possibilita a reconstrução da forma de onda do evento e não permite verificar diretamente sua conformidade com a curva de sensibilidade do equipamento. Dessa forma, existe a necessidade de uma nova representação gráfica que permita avaliar a severidade das VTCD.

A adoção do cálculo do valor eficaz da tensão através da janela de meio ciclo atualizada continuamente e da resolução de 1% para o histograma de frequências por nível por representarem o melhor compromisso para caracterizar todos os tipos de eventos de curta duração.

Uma estrutura bem definida de armazenamento dos registros de monitoração permite reduzir o tamanho dos arquivos e, conseqüentemente, o tempo de acesso aos dados e custos de armazenamento e transmissão dos mesmos. Por outro lado, o Banco de Dados Relacional permite automatizar a análise dos eventos, organizando os registros segundo o grau de severidade das VTCD, facilitando a descoberta do mecanismo de propagação dos eventos e permitindo avaliar rapidamente o desempenho do SEP ao longo de um período.

O condicionamento dos sinais analógicos de tensão, a compactação de dados através de métodos de compressão física e a aplicação de redes neurais para a análise dos registros de medição são assuntos que necessitam ser pesquisados para desenvolver um sistema de monitoração completo e eficiente para a avaliação da interação entre as cargas e o sistema elétrico.

Capítulo 3

Indicadores para Quantificação de VTCD

3.1 Introdução

A análise das ocorrências de VTCD pode ser uma tarefa árdua e de grande custo caso não haja indicadores confiáveis que permitam organizar e filtrar automaticamente os registros de eventos de curta duração segundo grau de severidade das VTCD sobre os equipamentos e/ou sistema elétrico.

De um modo geral, pode-se afirmar que os indicadores para VTCD visam expressar, de forma simples e objetiva, aspectos dos eventos de curta duração que permitam realizar análises qualitativas e/ou quantitativas relativas a:

- severidade dos eventos sobre as cargas sensíveis e sobre o SEP;
- mecanismo de propagação das VTCD no sistema elétrico;
- avaliação do custo das paradas de produção devido aos eventos de curta duração;

- identificação de regiões da rede elétrica mais vulneráveis as VTCD;
- eficácia de dispositivos de compensação ou atenuação dos impactos das VTCD.

De posse dos indicadores para VTCD, as indústrias podem, por exemplo, decidir por investimentos na robustez dos seus equipamentos a VTCD ou na compra de energia elétrica de um fornecedor que apresente melhor índice de desempenho face as VTCD. Em contrapartida, as concessionárias podem identificar os locais da rede elétrica que sofrem maior impacto e incidência das VTCD e avaliar a relação custo/benefício em melhorar a qualidade de energia elétrica por ela suprida. Além disso, permite aos órgãos reguladores estabelecer padrões mínimos de desempenho a serem cumpridos pelas concessionárias de energia elétrica e auxiliar na normatização de características das cargas a serem conectados na rede elétrica.

Os indicadores tradicionais para VTCD baseiam sua metodologia de análise simplesmente nos parâmetros magnitude e duração do evento, embora em [13] seja ressaltado que usar somente esses parâmetros é inadequado para caracterizar afundamentos de tensão, especialmente para análises da severidade das VTCD sobre cargas sensíveis. Entretanto, a duração do evento por níveis de tensão permite extrair informações estatísticas, em princípio, mais detalhadas para caracterizar uma VTCD.

Dessa forma, este capítulo abordará, entre outros, o método do histograma de frequências por nível como uma ferramenta capaz de disponibilizar elementos que permitam obter indicadores para estimar a severidade do evento e avaliar o desempenho da rede elétrica.

3.2 Formas de Caracterização de VTCD

3.2.1 Caracterização através da Magnitude e da Duração do Evento

Conforme mencionado nos capítulos 1 e 2 deste trabalho, um evento tem sua magnitude definida como o valor extremo da tensão remanescente e sua duração definida como o intervalo de tempo total em que a tensão eficaz violou a faixa de limites de detecção do evento.

A técnica de agregação temporal de eventos permite que sejam atribuídos dois parâmetros de magnitude e de duração a um único evento na mesma fase, sendo um para a elevação de tensão e outro para o afundamento (ou interrupção) de tensão. Para ilustrar esta situação, a Figura 3.2.1-(a) mostra a forma de onda de um evento, que possui 256 amostras por ciclo de onda da frequência nominal, e a na parte (b) é mostrada a curva de valor eficaz de janela de meio ciclo atualizada a cada nova amostra, e a cada meio ciclo (pontos em destaque), do evento.

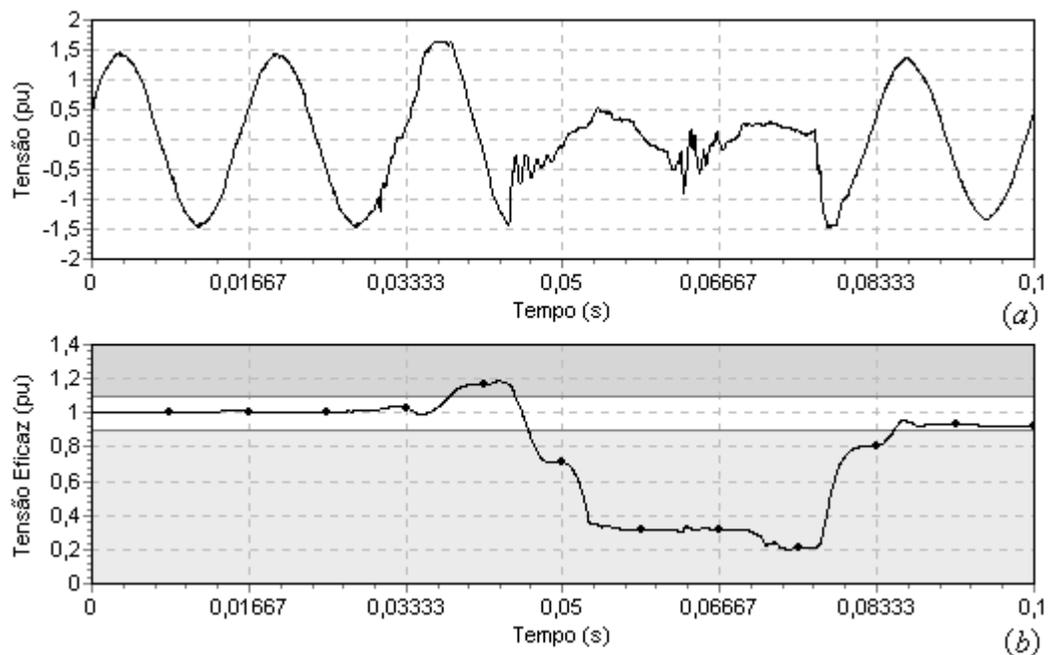


Figura 3.2.1: Curvas do evento: (a) forma de onda; (b) valor eficaz.

Os parâmetros de magnitude e de duração do evento podem ser facilmente obtidos através da codificação das amostras de tensão eficaz utilizando o histograma de frequência por níveis. A Figura 3.2.2-(a) mostra o histograma construído a partir da curva do valor eficaz atualizado a cada meio ciclo, com resolução de 10%, enquanto na parte (b) o histograma é construído a partir da curva do valor eficaz atualizado a cada nova amostra, com resolução de 1%.

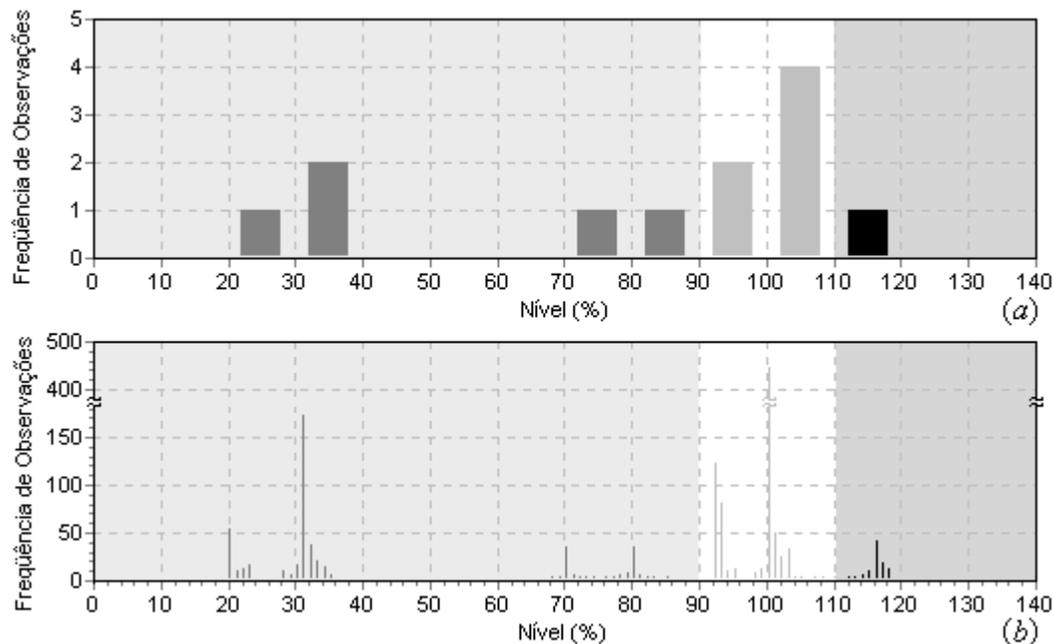


Figura 3.2.2: Histogramas de Frequência por Nível construído com resolução e atualização do cálculo do valor eficaz de: (a) 10% e discreta; (b) 1% e contínua, respectivamente.

Dessa forma, utilizando o histograma de frequências com resolução de 1%, é possível obter que a magnitude (m_a) e a duração (d_a) do afundamento de tensão são 0,20 pu e 38,8 ms, respectivamente, enquanto a magnitude (m_e) e a duração (d_e) da elevação são 1,19 pu e 6,9 ms, respectivamente.

Embora a magnitude do evento também seja superior ao limite de 1,1 pu, o evento é classificado somente como um Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT), pois a duração correspondente à elevação de tensão é inferior a um ciclo, que é o período de tempo necessário para o evento ser considerado como uma Elevação Momentânea de Tensão (EMT).

Verificando a conformidade dos parâmetros de magnitude e duração do evento com a curva de sensibilidade para equipamentos de tecnologia de informação (ITIC), conforme mostra a Figura 3.2.3, é possível constatar que este evento provavelmente provocará mau funcionamento a um equipamento de tecnologia de informação (ITE).

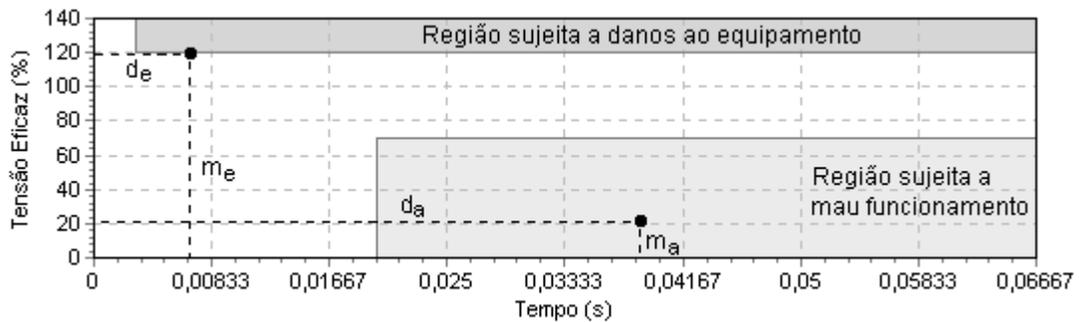


Figura 3.2.3: Conformidade do evento em relação à curva ITIC.

A metodologia EPRI/Electrotek adverte que somente os parâmetros de magnitude e de duração não são capazes de descrever completamente um evento que não possua a forma retangular [23]. Assim, a metodologia atribui a um mesmo evento diversas durações, conforme limites específicos de nível de tensão utilizados para caracterizar o evento. A Figura 3.2.4 ilustra a aplicação desta técnica utilizando os limites de 80% e 50% da tensão eficaz.

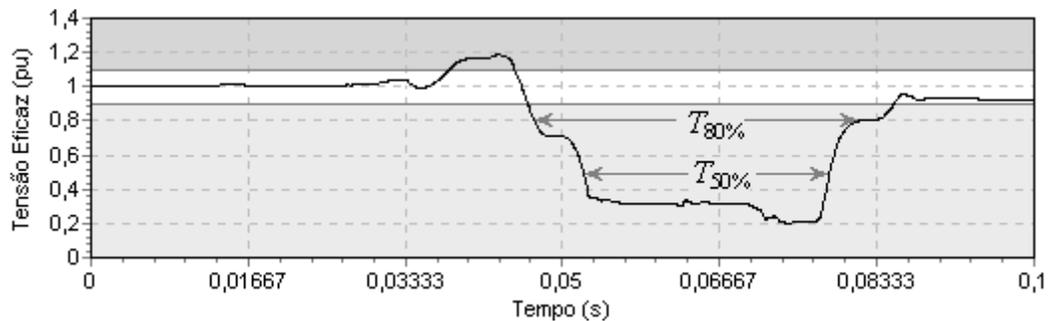


Figura 3.2.4: Exemplo da aplicação da metodologia EPRI/Electrotek.

O histograma de frequência por nível pode ser utilizado para fornecer essas durações específicas do evento. A partir do histograma Figura 3.2.2-(b), acumulando o total de observações que ficaram abaixo do nível de 50%, é possível obter que o evento ficou 26,17 ms abaixo de 50% da tensão eficaz ($T_{50\%}$). Da mesma forma, constata-se que o evento ficou 36,72 ms abaixo de 80% da tensão eficaz ($T_{80\%}$).

Normalmente, utiliza-se o limiar de duração proposto para a classificação de eventos de curta duração que são: 140, 120, 110, 90, 80, 50 e 10%.

3.2.2 Caracterização através da Curvas de Duração por Níveis

O processo de interpretação das curvas do histograma de frequência por nível é vagaroso e não permite verificar diretamente a conformidade do evento com a curva de sensibilidade do equipamento. Entretanto, a curva de frequências acumulativas do histograma, em função do intervalo de tempo em que a tensão eficaz foi observada em cada nível, permite realizar essa tarefa de modo simples, eficiente e rápido.

Define-se como Curva de Duração por Níveis a representação gráfica da função de probabilidade acumulativa das amostras classificadas desde o nível 0 até o nível 100%, ou do nível 200% até o nível 100%, em termos do intervalo de tempo de amostragem, ou seja, da frequência das observações em cada nível de tensão [16].

As Figura 3.2.5 (a) e (b) ilustram a aplicação desta metodologia nos histogramas de frequência por nível da Figura 3.2.2 com resolução de 10% e 1%, respectivamente.

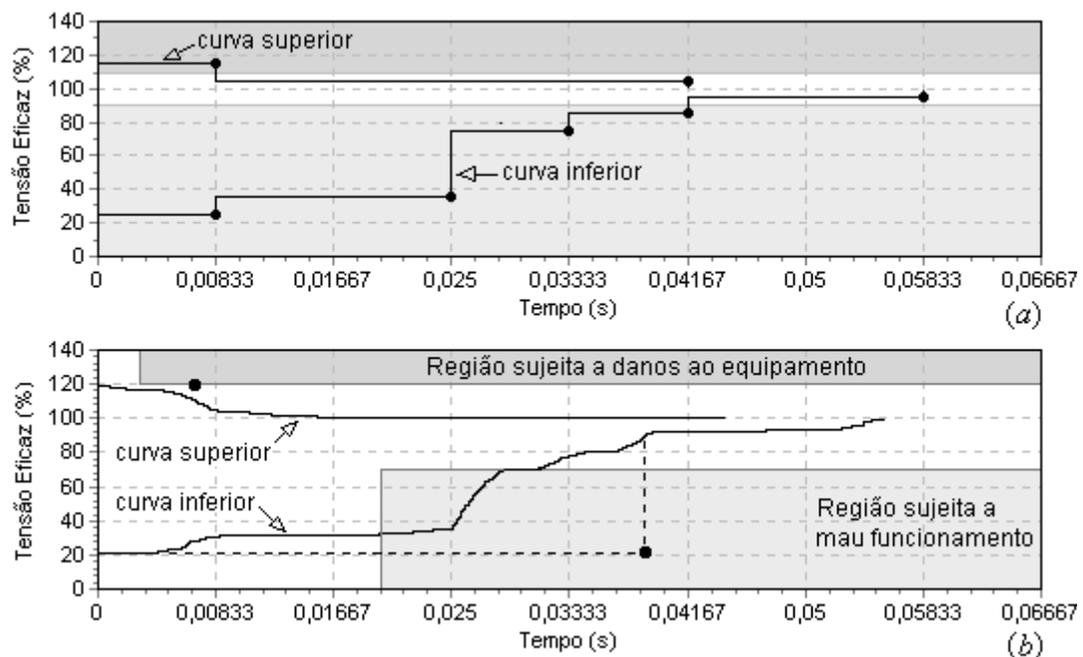


Figura 3.2.5: Curvas de Duração por Níveis com resolução de: (a) 10%; (b) 1%.

A curva inferior de duração por níveis permite determinar o intervalo de tempo em que o evento permaneceu abaixo de um determinado nível. Por exemplo, a partir da Figura 3.2.5-(a) é possível obter que o evento permaneceu 8,33 ms (meio ciclo) abaixo de 30% ou 25 ms abaixo de 50% ou 41,67 ms abaixo de 90% da tensão eficaz.

Por outro lado, a curva superior de duração por níveis indica o intervalo de tempo em que o evento ficou acima de um determinado nível, como por exemplo, o evento permaneceu 8,33 ms acima de 110% da tensão nominal.

É importante ressaltar que uma resolução de 10% do histograma de frequência por níveis tem como desvantagem uma imprecisão elevada na avaliação da magnitude e da duração do evento. A adoção de uma resolução de 1% reduz a níveis aceitáveis essa imprecisão permitindo a construção da curva de duração por níveis com maior riqueza de detalhes, que é imprescindível para uma avaliação precisa da severidade da VTCD.

Embora o aumento do número de classes diminua ainda mais a imprecisão sobre os parâmetros de magnitude e duração do evento, tem como desvantagem necessitar maior quantidade de memória para armazenamento e aumentar o tempo de processamento das informações contidas no histograma de frequências por nível.

Na Figura 3.2.5-(b) pode-se obter diretamente que a magnitude do afundamento é de 0,2 pu e o evento permaneceu 38,8 ms abaixo de 90% da tensão eficaz, enquanto a magnitude da elevação é de 1,19 pu e o evento permaneceu 6,9 ms acima de 110% da tensão eficaz. Note que na mesma figura, são representados em forma de ponto os parâmetros de magnitude e de duração do evento para efeitos de comparação entre os métodos.

Como é possível observar, a curva inferior de duração por níveis, do mesmo modo que os parâmetros de magnitude e de duração, violam o limite inferior da curva ITIC, resultando em um provável mau funcionamento ou desligamento de um equipamento de tecnologia de informação.

A Figura 3.2.6 ilustra um exemplo em que fica claro que a curva de duração por níveis representa melhor o evento que os parâmetros de magnitude e de duração, Enquanto a curva de

duração por níveis não viola os limites da região de tolerância de tensão da ITIC, os parâmetros de magnitude e de duração indicam que há violação (avaliação conservativa).

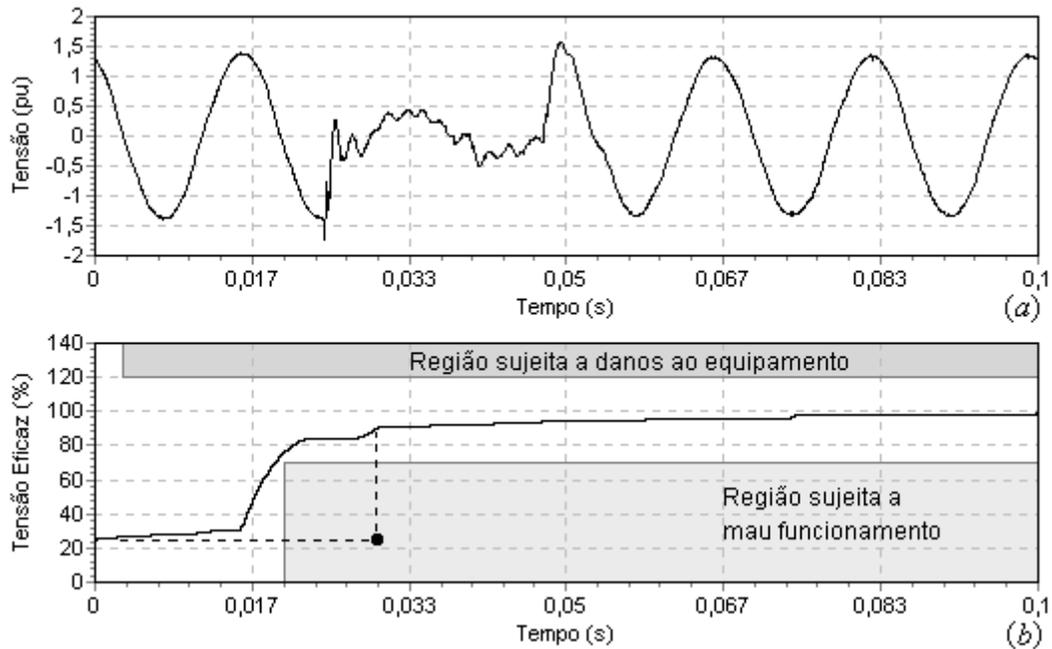


Figura 3.2.6: Curvas de: (a) forma de onda do evento; (b) duração por níveis.

3.2.3 Caracterização através da Perda de Tensão

Define-se como perda de tensão (P_V) a expressão [24]:

$$P_V = \int [1 - V(t)] dt, \quad (3.2.1)$$

onde V é a magnitude da tensão eficaz durante o afundamento de tensão, expresso em pu.

De outra forma, o método de Detroit Edson avalia o impacto da perda de tensão através da magnitude do afundamento de tensão eficaz nas fases A (V_a), B (V_b) e C (V_c), expressas em pu, através da expressão [25]:

$$"sag\ score" = 1 - \frac{V_a + V_b + V_c}{3}. \quad (3.2.2)$$

É importante ressaltar que o método considera que se uma das fases possui magnitude superior a 1 pu a mesma terá seu valor atribuído em 1 pu.

3.2.4 Caracterização através da Perda de Energia

A perda de energia (P_E) é definida como sendo [24]:

$$P_E = \int [1 - V^2(t)] dt, \quad (3.2.3)$$

onde $V(t)$ é a magnitude instantânea da tensão durante o afundamento de tensão, expresso em pu.

De outra forma, Rao Thallam define a “Energia do Afundamento de Tensão” (E_{AT}) como:

$$E_{AT} = [1 - V]^2 \cdot d, \quad (3.2.4)$$

onde V é a magnitude (em pu) e d é a duração do afundamento de tensão. Entretanto, para afundamentos de tensão que possuam forma não retangular é mais adequado calcular a energia a partir da integral, expressa como:

$$E_{AT} = \int [1 - V(t)]^2 \cdot dt. \quad (3.2.5)$$

onde $V(t)$ é a magnitude instantânea da tensão durante o afundamento de tensão, expresso em pu.

Para Heydt o impacto do evento [26] depende da quantidade do excesso de energia entregue à carga durante uma elevação de tensão ou da quantidade de energia não entregue à carga durante um afundamento de tensão.

Com base nessa idéia e, considerando que na curva CBEMA a característica de perda de energia para afundamentos de tensão é constante, a perda de energia para um afundamento de tensão pode ser calculada por:

$$P_{EAT} = [1 - V]^{3,14} .d , \quad (3.2.6)$$

onde, V é a magnitude (em pu) e d é a duração em (milissegundos) do afundamento de tensão. Para medições trifásicas, a perda de energia pode ser calculada a partir da soma da perda de energia em cada uma das fases, ou seja,

$$P_{EAT} = [1 - V_a]^{3,14} .d + [1 - V_b]^{3,14} .d + [1 - V_c]^{3,14} .d . \quad (3.2.7)$$

Para afundamentos de tensão que possuam forma não retangular é mais adequado calcular a perda de energia durante o evento a partir da integral dos valores instantâneos da magnitude de tensão.

Uma restrição ao utilizar a integral para calcular a perda de tensão ou perda de energia do evento é a falta de definição dos limites de integração. É evidente que diferentes períodos de integração para um mesmo evento podem resultar em variações significativas no valor do índice.

3.3 Índices de Severidade para VTCD

Entende-se por índice de severidade para Variações de Tensão de Curta Duração como sendo um número, adimensional ou não, que expressa a medida ou gradação do impacto de um evento de curta duração sobre uma carga sensível.

De um modo geral, índice de severidade para VTCD permite:

- Quantificar a severidade de um evento;
- Comparar o impacto do evento em cada uma das fases;
- Organizar os registros de medição segundo o grau de severidade das VTCD;
- Estudar o mecanismo de propagação das VTCD;
- Contabilizar o número de eventos que violam a curva de sensibilidade de um equipamento em uma ou mais barras;
- Avaliar o desempenho do SEP.

O índice de severidade para VTCD pode ser interpretado como uma medida da

conformidade do evento de curta duração com a curva de sensibilidade do equipamento, ou seja, o valor desse índice fornece o grau de impacto do evento sobre uma carga sensível e serve como parâmetro para organizar e filtrar os registros de medições das VTCD.

Dessa forma, o índice de severidade do evento pode ser apurado através dos parâmetros de magnitude e de duração do evento ou através da curva de duração por níveis do mesmo.

3.3.1 Índice baseado na Magnitude e na Duração do Evento

O índice de severidade baseado na magnitude e na duração do evento, relativo a uma curva de sensibilidade de um equipamento, é definido como [24]:

$$S_{md} = \frac{1-V}{1-V_{sens}(d)}, \quad (3.3.1)$$

onde, V é a magnitude da tensão eficaz do evento (em pu) e $V_{sens}(d)$ é o valor da magnitude da tensão eficaz (em pu) para a curva de sensibilidade, associada à duração (d).

A curva de sensibilidade pode ser a CBEMA ou a ITIC, embora o método também funcione igualmente bem para outras curvas de sensibilidade de equipamentos. Para ilustrar a aplicação da metodologia, considere a avaliação da conformidade do evento mostrado na Figura 3.2.3 através da curva ITIC, de onde é possível obter que o índice de severidade do evento relativo ao afundamento de tensão é um número adimensional com o valor de 2,67, enquanto que para a elevação de tensão é de 0,95.

É importante ressaltar que o valor do índice de severidade baseado na magnitude e na duração do evento para “pontos” fora da região de tolerância de tensão da curva de sensibilidade do equipamento é superior à unidade, e inferior à unidade dentro da região de tolerância. Nos “pontos” localizados sobre a curva de sensibilidade seu valor é igual à unidade. E ainda, o valor do índice de severidade é diretamente proporcional ao afastamento da magnitude do evento em relação à da tensão nominal (1 pu) do sistema.

3.3.2 Índice baseado na Curva de Duração por Níveis do Evento

Conforme mencionado, os parâmetros de magnitude e de duração do evento não são capazes de caracterizar corretamente todos os tipos de VTCD, principalmente para os eventos que não possuem forma retangular. Dessa maneira, o presente trabalho propõe uma nova metodologia para a apuração de um índice mais confiável e mais simples para avaliar o grau de severidade do evento, que é baseado na curva de duração por níveis do evento.

Define-se como índice de severidade baseado na curva de duração por níveis, a energia associada à área de violação da região de tolerância de tensão da curva de sensibilidade pela curva de duração por níveis do evento, conforme ilustra a Figura 3.3.1.

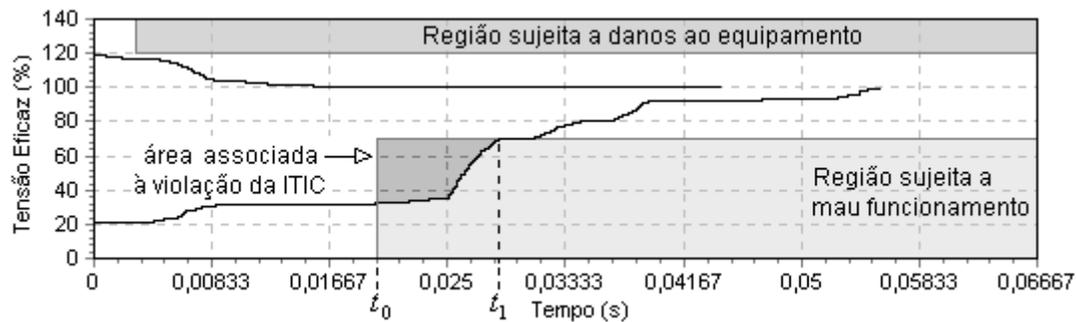


Figura 3.3.1: Área associada à violação da curva de sensibilidade (ITIC).

O índice de severidade da energia de violação pela VTCD, diferentemente das demais técnicas de cálculo de energia apresentadas anteriormente, possui um período de integração bem definido, cujo início (t_0) é assumido como sendo o instante em que o nível de tensão deixa a faixa de tolerância da curva ITIC e o final (t_1) é assumido como sendo o instante em que o nível de tensão da curva de duração por níveis retorna para dentro da faixa de tolerância.

Dessa forma é possível escrever:

$$S_{cd} = \int_{t_0}^{t_1} [V_{cd}(t) - V_{sens}(t)]^2 . dt , \quad (3.3.2)$$

onde $V_{cd}(t)$ é o nível de tensão (em pu) da curva de duração por níveis e $V_{sens}(t)$ é o nível de tensão (em pu) da curva de sensibilidade do equipamento.

Para cada uma das fases do sistema pode-se atribuir dois índices de severidade da energia de violação pela VTCD: um superior que corresponde à energia associada à área de violação da curva ITIC pela curva de duração por níveis superior e outro inferior que corresponde à energia associada à área de violação da curva ITIC pela curva de duração por níveis inferior.

O índice de severidade inferior está relacionado com a energia não entregue pelo sistema, que pode ser capaz de provocar mau funcionamento a um equipamento de informação, enquanto o índice de violação superior está relacionado com a energia entregue em excesso pelo sistema, que pode ser capaz de provocar danos ao equipamento ou reduzir a vida útil do mesmo.

A Figura 3.3.2-(a) ilustra um exemplo de um evento trifásico, cujos parâmetros de magnitude e de duração nas três fases são praticamente iguais. Entretanto, por inspeção visual, constata-se que o evento é mais severo na fase C do que nas fases A e B da rede elétrica. Construindo a curva de duração por níveis para as três fases, observa-se que a fase C possui uma área de violação maior do que as das fases A e B.

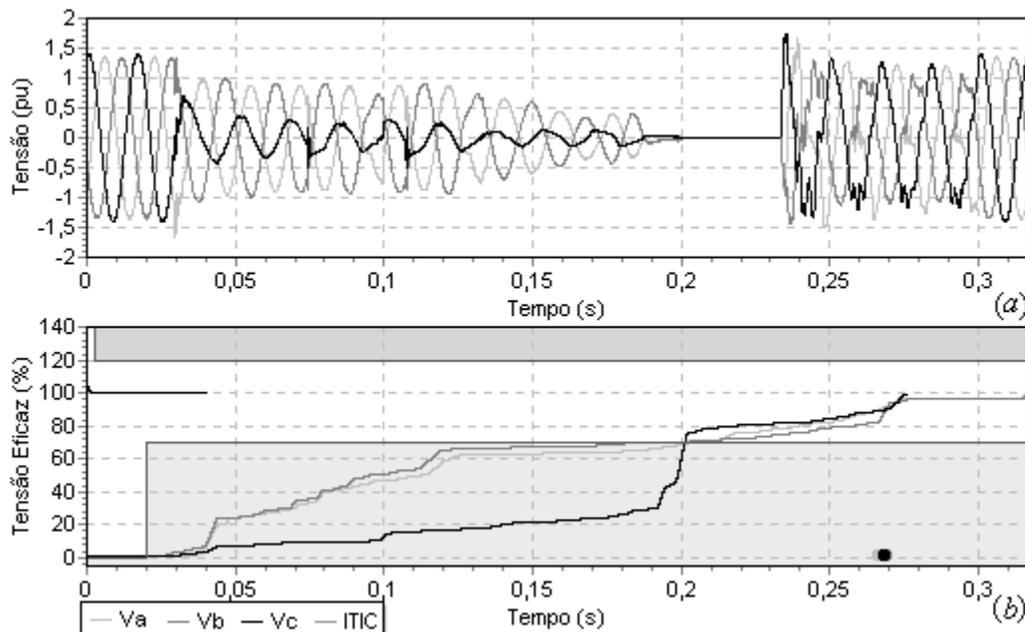


Figura 3.3.2: Curvas de: (a) forma de onda; (b) durações por níveis do evento.

Os índices de severidade do evento baseado nos parâmetros de magnitude e de duração do evento são iguais a 3,333333, enquanto os índices de severidade da energia de violação da curva ITIC para as fases A, B e C são 0,020067 pu, 0,018190 pu e 0,055882 pu, respectivamente. Dessa forma, é possível concluir que o índice de severidade baseado na curva de duração por níveis é um indicador, a princípio, mais confiável para se avaliar o grau de severidade de uma VTCD que simplesmente os parâmetros de magnitude e duração do evento, pois os índices de severidade de energia de violação mostram claramente que o impacto é bem maior na fase C, do que nas fases A e B. Note que os parâmetros de magnitude e de duração são muito conservativos, pois indicam violações similares para as 3 fases do sistema.

É importante ressaltar que caso a curva de duração por níveis do evento não viole a região de tolerância de tensão da curva de sensibilidade, o valor do índice de severidade é nulo. Dessa forma, o índice poderia servir como parâmetro para decidir se armazena ou não a forma de onda de um distúrbio em uma unidade de monitoramento de VTCD, evitando o sobre-carregamento de dados da unidade com dados que não sejam capazes de degradar substancialmente a QEE do sistema.

O índice de severidade baseado na curva de duração por níveis requer maior capacidade computacional do que o baseado nos parâmetros de magnitude e de duração. Entretanto, fornece uma informação, no mínimo, mais detalhada sobre o evento.

3.4 Avaliação do Desempenho do SEP face a VTCD

3.4.1 Método Detroit Edison

Em 1994, a companhia Detroit Edison e seus três grandes consumidores automotivos (Chrysler, Ford e General Motors) desenvolveram um contrato especial de produção (SMC) que estabelecia compensações financeiras a estes consumidores caso o número de eventos anuais excedesse uma quantidade determinada em contrato [25].

O método especifica cinco regras para considerar o distúrbio detectado como um evento a ser listado, que são:

- A tensão em pelo menos uma das três fases deve ser inferior a 0,75 pu;
- Afundamentos de tensão causados por consumidores não são considerados;
- Afundamentos de tensão registrados em alimentadores sem carga não são incluídos;
- Somente o pior afundamento de tensão a cada intervalo de 15 minutos é considerado. O intervalo de 15 minutos inicia quando o primeiro afundamento de tensão é detectado e termina 15 minutos após não haver a detecção de um novo evento.
- Se uma interrupção de tensão é medida dentro do intervalo de 15 minutos, então qualquer outro afundamento de tensão dentro do intervalo é desconsiderado.

O algoritmo utilizado para qualificar e quantificar os afundamentos de tensão é o “sag score” e foi mostrado na seção 3.2.3, através da expressão (3.2.2). Assim, é possível contabilizar o número de eventos que atingem uma barra do sistema e estimar a perda média de tensão ocorrida durante os eventos ao longo de um período de tempo.

A forma encontrada para ressarcir as indústrias pelas paradas de produção consiste em avaliar a quantidade excedente do índice de eventos considerado em contrato [25]. Por exemplo, caso o indicador total computado seja de 2,56 e o valor máximo estabelecido para esse indicador seja de 2,1, a concessionária terá de pagar 46% do valor da “multa” ajustada em contrato.

Alternativamente, pode-se estabelecer “taxas” diferenciadas para intervalos de faixas do indicador “sag score”. Por exemplo, para uma variação do indicador abaixo de 0,3 pu a multa corresponde a 100%, enquanto que para valores entre 0,3 pu e 0,6 pu, a multa corresponde a 65% e entre 0,6 pu e 0,75 pu, a multa corresponde a 35% do seu valor total.

3.4.2 Método da Magnitude e Duração do Evento

O desempenho a VTCD de uma ou mais barras do SEP tradicionalmente é avaliada através da incidência dos eventos de curta duração, distribuídas em faixas de magnitude e de

duração. Esses indicadores para VTCD fornecem uma estimativa da frequência de paradas de produção para as cargas sensíveis de um consumidor. As técnicas para apuração dos indicadores variam basicamente na forma de agrupar a frequência dos eventos em termos da magnitude e da duração das VTCD ao longo de um período de tempo.

A metodologia UNIPED (DISISP) distribui a ocorrência de eventos, exclusivamente do tipo afundamentos de tensão, segundo as classes de magnitude e de duração do evento, conforme mostra a Tabela 3.1 [24].

Tabela 3.1: Tabela de distribuição de frequência de afundamentos de tensão da UNIPED.

magnitude – m	duração – d						
	(ciclos)		(segundos)				
(pu)	$0,5 \leq d < 5$	$5 \leq d < 30$	$0,5 \leq d < 1$	$1 \leq d < 3$	$3 \leq d < 20$	$20 \leq d < 60$	$d > 60$
$0,7 \leq m < 0,9$							
$0,4 \leq m < 0,7$							
$0,01 \leq m < 0,4$							
$m < 0,01$							

A IEC 61000-4-11 recomenda utilizar durações diferentes, conforme ilustra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Tabela de distribuição de frequência de afundamentos de tensão da IEC 61000-4-11.

magnitude - m	duração d – (ciclos)					
(pu)	$0,5 \leq d < 1$	$1 \leq d < 5$	$5 \leq d < 10$	$10 \leq d < 25$	$25 \leq d < 50$	$d > 50$
$0,7 \leq m < 0,9$						
$0,4 \leq m < 0,7$						
$0,01 \leq m < 0,4$						
$m < 0,01$						

Em contrapartida a norma da África do Sul, NRS 048 [27], segundo a terminologia do IEEE, estabelece outros limites, conforme ilustra a Tabela 3.3 [24].

Tabela 3.3: Tabela de distribuição de frequência de afundamentos de tensão da NRS-048.

magnitude – m	duração – d – (ciclos)		
(pu)	$1 \leq d < 7,5$	$7,5 \leq d < 30$	$30 \leq d < 150$
$0,8 \leq m < 0,9$	Y	Y	Y
$0,4 \leq m < 0,8$	X	S	Z
$m < 0,4$	T	T	Z

A Figura 3.4.1 ilustra graficamente o método proposto por esta norma. É importante observar que a duração do evento na Figura 3.4.1 foi expressa em ciclos, pois o método original foi desenvolvido para a frequência de 50 Hz, cabendo sua adequação para o sistema na frequência de 60 Hz.

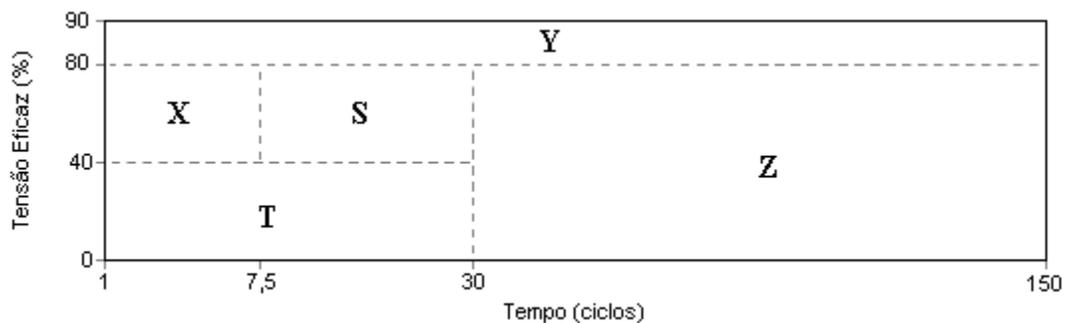


Figura 3.4.1: Representação gráfica dos limites para VTCD, segundo a NRS 048.

As células Y, X, S, T e Z visam estimar o número de paradas de produção mensais, ou anuais, em função da vulnerabilidade de carga. Dessa forma, é possível estabelecer uma quantidade máxima de afundamentos de tensão permissível para cada célula, o que torna possível a avaliação o desempenho em uma ou mais barras do sistema elétrico.

3.4.3 Método da Incidência Acumulada de Eventos

As recomendações IEEE Std 493 [28] e IEEE Std 1346 [29] propõe o gráfico de incidência acumulada de eventos como técnica para avaliar o desempenho do SEP em uma ou mais barras do sistema em virtude dos afundamentos de tensão observados ao longo de um período de tempo.

O método é baseado na distribuição da incidência dos eventos em faixas de magnitude e em faixas de duração. A Tabela 3.4 ilustra um exemplo hipotético da aplicação do método em uma barra do SEP, considerando registros de medição de período de um ano em termos de amplitude e duração.

Tabela 3.4: Distribuição hipotética da incidência dos eventos de uma barra do SEP.

magnitude (pu)	duração (s)				
	$0 \leq d < 0,2$	$0,2 \leq d < 0,4$	$0,4 \leq d < 0,6$	$0,6 \leq d < 0,8$	$d \geq 0,8$
$0,8 \leq m < 0,9$	1	1	1	1	1
$0,7 \leq m < 0,8$	1	1	1	1	1
$0,6 \leq m < 0,7$	1	1	1	1	1
$0,5 \leq m < 0,6$	1	1	1	1	1
$0,4 \leq m < 0,5$	1	1	1	1	1
$0,3 \leq m < 0,4$	1	1	1	1	1
$0,2 \leq m < 0,3$	1	1	1	1	1
$0,1 \leq m < 0,2$	1	1	1	1	1
$0,0 \leq m < 0,1$	1	1	1	1	1

A Tabela 3.5 mostra a incidência acumulada de eventos da Tabela 3.4 que possuem magnitude igual ou inferior a um determinado nível de tensão e duração superior a um determinado intervalo de tempo.

Tabela 3.5: Acumulação da incidência dos eventos de uma barra do SEP.

Magnitude	duração (s)				
	$d \geq 0$	$d \geq 0,2$	$d \geq 0,4$	$d \geq 0,6$	$d \geq 0,8$
90%	45	36	27	18	9
80%	40	32	24	16	8
70%	35	28	21	14	7
60%	30	24	18	12	6
50%	25	20	15	10	5
40%	20	16	12	8	4
30%	15	12	9	6	3
20%	10	8	6	4	2
10%	5	4	3	2	1

Por exemplo, são contabilizados 15 eventos (na região hachurada da Tabela 3.4) que possuem intensidade igual ou inferior a 50% da tensão nominal e duração superior a 0,4 segundos. Da mesma forma, existem 20 afundamentos de tensão com magnitude igual ou inferior a 50% da tensão nominal e duração superior a 0,2 segundos.

De posse da Tabela 3.5 é possível construir o gráfico de coordenadas de afundamentos de tensão, mostrado na Figura 3.4.2. As curvas representam o número de afundamentos de tensão por ano e como neste exemplo existe apenas um afundamento em cada uma das células da Tabela 3.4., cada afundamento de tensão é marcado por um ponto em destaque na figura.

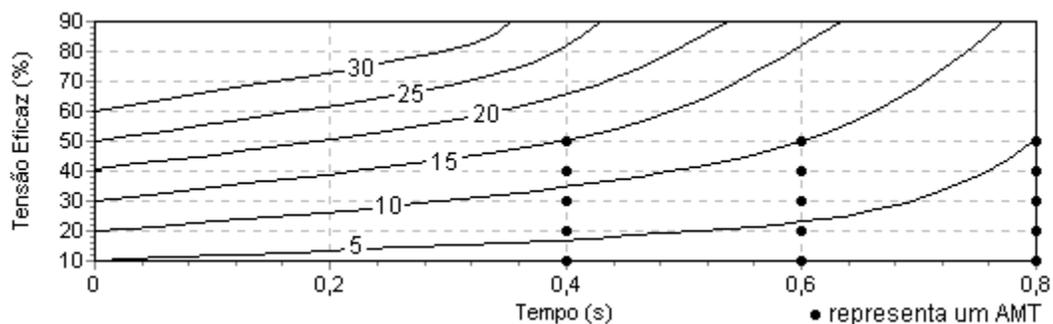


Figura 3.4.2: Gráfico de coordenadas de afundamentos de tensão.

Assim é possível verificar que a curva para 15 eventos faz interseção com a linha de grade vertical para 0,4 segundos e com a linha de grade horizontal para 50% da tensão nominal, ou seja, 15 afundamentos de tensão possuem magnitude igual ou inferior a 50% com duração superior a 0,4 segundos. Note que existem 15 pontos em destaque (eventos) correspondentes a estes limites.

A interpolação linear entre as curvas de incidência acumulada funciona razoavelmente bem para estimar as curvas não representadas, especialmente em casos em que a distribuição dos afundamentos é uniforme.

As curvas de incidência acumulada podem ser utilizadas para estimar o número de eventos que podem causar mau funcionamento ou desligamento de um determinado equipamento. Para tal, é necessário confrontar a curva de sensibilidade do equipamento com a curva de incidência acumulada de afundamentos de tensão.

Na Figura 3.4.3 está representada a curva de sensibilidade de um equipamento e as curvas de incidência acumuladas dos eventos. O número de eventos capazes provocar mau funcionamento ao equipamento é a soma dos afundamentos das três regiões hachuradas do gráfico.

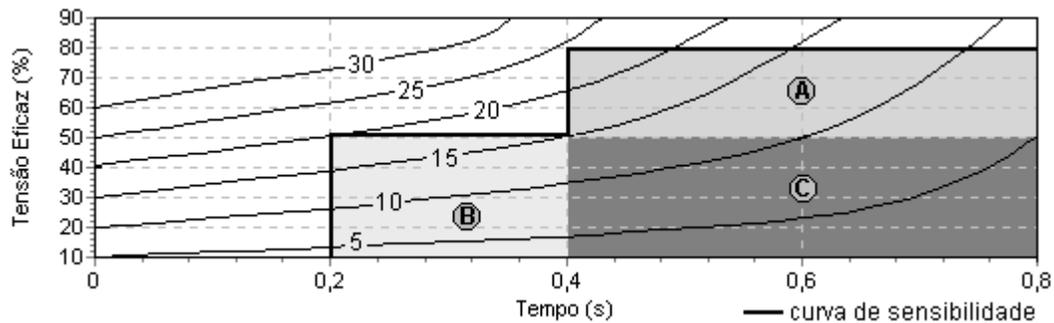


Figura 3.4.3: Conformidade com a curva de sensibilidade do equipamento.

Observando o gráfico é possível constatar que a região C acumula 15 eventos, enquanto as regiões A e C acumulam, por interpolação linear, 24 afundamentos e as regiões B e C acumulam 20 eventos. Dessa forma, tem-se 9 eventos para a região A e 5 para a região B, resultando num total de 29 eventos por ano que podem provocar mau funcionamento a um equipamento com este tipo de curva conectado a esta barra do sistema elétrico.

3.4.4 Método proposto pela EFEI [30]

Do mesmo modo que a proposta anterior, essa metodologia baseia-se na violação da região de tolerância da curva de sensibilidade do equipamento pelos parâmetros de magnitude e de duração do evento. Caso o evento não viole esta região é esperado que o equipamento esteja operando (“on” = 1) e caso viole, é esperado que o equipamento seja desligado (“off” = 0).

A taxa de transição do consumidor i , do estado ligado para o desligado (λ_{10}), é dado pelo número anual de paradas de produção do processo industrial desse consumidor (N), ou seja,

$$\lambda_{10}(i) = N(i). \quad (3.4.1)$$

A taxa de transição do consumidor i , do estado desligado para o ligado (λ_{01}), é dado pela razão entre o número de horas do período de um ano (8760) e o tempo médio, em horas, para que o consumidor retome a plena produção (T), ou seja,

$$\lambda_{01}(i) = \frac{8760}{T(i)}. \quad (3.4.2)$$

Dessa forma, a probabilidade de que o consumidor esteja operando ou em condições de trabalhar, é dado por:

$$P_{on}(i) = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10} + \lambda_{01}}. \quad (3.4.3)$$

Assim, a probabilidade de que o consumidor não esteja operando ou sem condições de trabalhar, é dado por:

$$P_{off}(i) = 1 - P_{on}(i) = \frac{\lambda_{10}}{\lambda_{10} + \lambda_{01}}. \quad (3.4.4)$$

A demanda não suprida pelo sistema ao consumidor pode ser avaliada a partir da fração demanda total (D) do consumidor pela expressão:

$$DND(i) = P_{off}(i).D(i). \text{ [MWh]} \quad (3.4.5)$$

Assim, de posse do fator de carga, é possível avaliar a energia não distribuída para o consumidor, através da expressão:

$$END(i) = 8760.DND(i).Fc(i). \text{ [MWh]} \quad (3.4.6)$$

O custo anual relativo às paradas de produção de um consumidor pode ser calculado através do custo por parada de produção (C) desse consumidor (incluindo as perdas de produção, homens/hora e reparos em equipamentos) e do número anual de paradas de processo industrial

desse consumidor. Assim,

$$C\$(i) = N(i).C(i). \text{ [US$/ano]} \quad (3.4.7)$$

De outra forma, esses indicadores podem ser especificados através de sua média, realizando o somatório das contribuições individuais de cada consumidor dividido pelo número total de consumidores (n).

É importante ressaltar que esse indicador seria mais apropriado caso fossem avaliados os custos de paradas de produção de forma distinta os eventos do tipo afundamento tensão das elevações de tensão, devido à possibilidade deste tipo de evento de curta duração provocar danos ao equipamento.

E ainda, esse indicador seria mais confiável caso fossem utilizadas as curvas de duração por níveis, ao invés dos parâmetros de magnitude e de duração do evento, conforme a proposta original desse indicador.

3.4.5 Método EPRI/Electrotek de avaliação do impacto sobre consumidores

O valor do índice é denominado de $SARFI_x$ (“System Average RMS – Variation – Frequency Index_{voltage}”) e representa a frequência de eventos ocorridos em função de limiares específicos de tensão.

O $SARFI_{\text{magnitude}}$ é definido para eventos de curta duração, ou seja, que possuam duração compreendida entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Esse índice pode ser dividido em grupos de durações inferiores – instantâneos (SIARFI), momentâneos (SMARFI) e temporários (STARFI) – conforme as classificações de duração de eventos da recomendação IEEE 1159, como ilustram as Tabela 3.6 e Tabela 3.7.

Tabela 3.6: Tabela de indicadores EPRI/Electrotek para elevações de tensão.

magnitude (m)	duração (d)			
em pu	$0,5 \leq d < 60$ s	$0,5 \leq d < 0,5$ s	$0,5 \leq d < 3$ s	$3 \leq d < 60$ s
$m > 1,4$	SARFI ₁₄₀	SIARFI ₁₄₀	SMARFI ₁₄₀	STARFI ₁₄₀
$1,2 < m \leq 1,4$	SARFI ₁₂₀	SIARFI ₁₂₀	SMARFI ₁₂₀	STARFI ₁₂₀
$1,1 < m \leq 1,2$	SARFI ₁₁₀	SIARFI ₁₁₀	SMARFI ₁₁₀	STARFI ₁₁₀

Tabela 3.7: Tabela de indicadores EPRI/Electrotek para afundamentos de tensão.

magnitude (m)	duração (d)			
em pu	$0,5 \leq d < 60$ s	$0,5 \leq d < 0,5$ s	$0,5 \leq d < 3$ s	$3 \leq d < 60$ s
$0,8 \leq m < 0,9$	SARFI ₉₀	SIARFI ₉₀	SMARFI ₉₀	STARFI ₉₀
$0,7 \leq m < 0,8$	SARFI ₈₀	SIARFI ₈₀	SMARFI ₈₀	STARFI ₈₀
$0,5 \leq m < 0,7$	SARFI ₇₀	SIARFI ₇₀	SMARFI ₇₀	STARFI ₇₀
$0,1 \leq m < 0,5$	SARFI ₅₀	SIARFI ₅₀	SMARFI ₅₀	STARFI ₅₀
$m < 0,1$	SARFI ₁₀	SMARFI ₁₀		STARFI ₁₀

O desempenho a afundamentos de tensão das diferentes barras do sistema pode ser comparado selecionando-se um limiar específico, como por exemplo, de 70% [31]. A Figura 3.4.4-(a) ilustra um exemplo hipotético de avaliação do desempenho individual de uma barra do sistema, sujeita a 10 eventos por ano, com magnitude inferior a 70% da tensão eficaz. Na parte (b), é realizada a comparação hipotética entre 5 diferentes barras do sistema elétrico do indicador SARFI com tensão eficaz inferior a 70%. É importante notar que a técnica continua sendo baseada no parâmetro de magnitude do evento, pois ela apenas seleciona os eventos conforme um limiar de tensão específico.

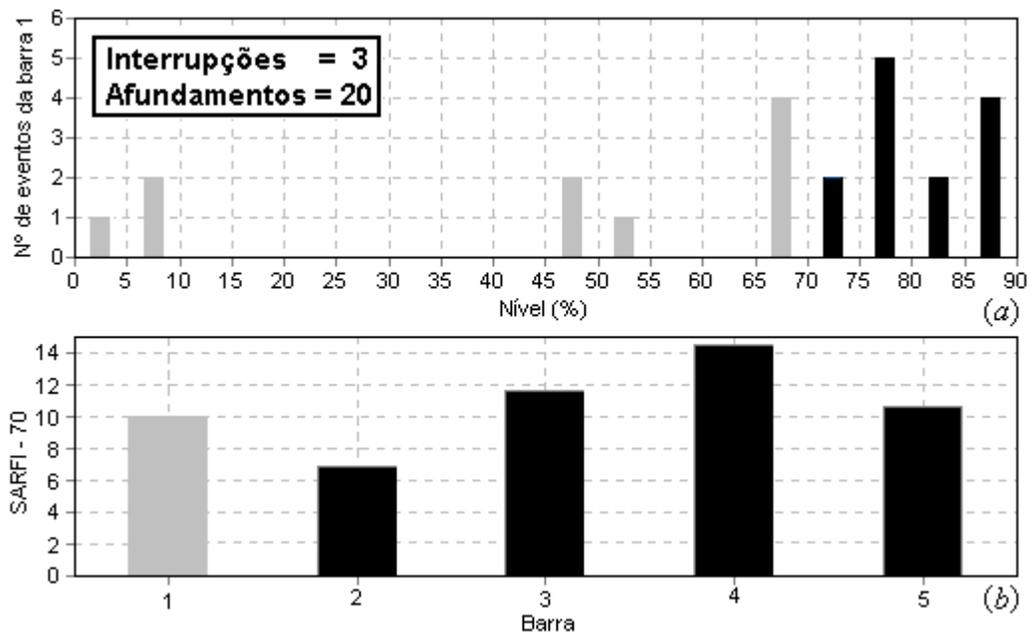


Figura 3.4.4: Índice SARFI: (a) distribuição dos eventos em faixas de tensão; (b) SARFI₇₀ para diferentes barras do sistema.

De outra maneira, o desempenho individual de uma barra pode ser caracterizado utilizando a verificação da conformidade dos parâmetros de magnitude e de duração do evento em relação à curva de sensibilidade de um equipamento, que é denominado de SARFI_{curve}.

A Figura 3.4.5 ilustra um exemplo hipotético onde foram registrados 14 eventos, onde 7 afundamentos de tensão violam a curva de sensibilidade de equipamentos de informação (ITIC) e nenhuma elevação de tensão viola a mesma.

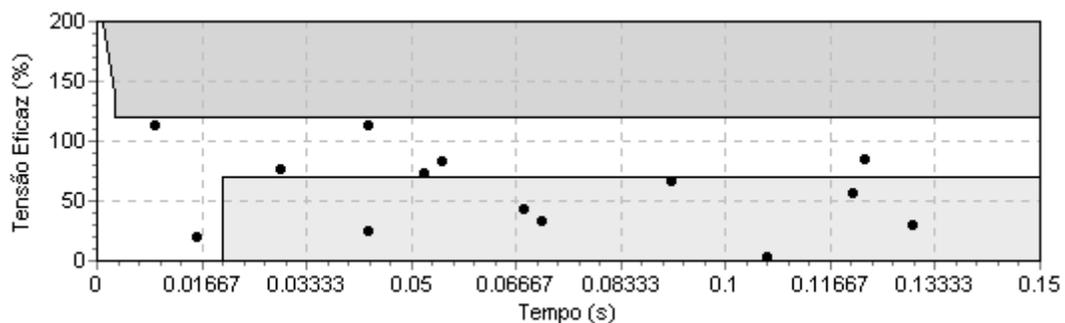


Figura 3.4.5: Conformidade dos eventos com a curva ITIC.

O processo de contagem de eventos que violam a curva ITIC pode ser automatizado através do índice de severidade baseado na magnitude e na duração do evento, pois valores do índice maior que o valor unitário indicam violação da região tolerância de tensão da curva de sensibilidade.

Diferentemente das propostas anteriores, o $SARFI_x$ expressa a estimativa do número médio de consumidores (N_i) que foram afetados pelo evento, para uma variação específica da tensão eficaz de $x\%$ durante um período de tempo [23], para avaliar o desempenho do sistema elétrico.

Sabendo o número total de consumidores do sistema (N_T) é possível escrever:

$$SARFI_x = \sum \frac{N_i}{N_T}, \quad (3.4.8)$$

onde, x representa os possíveis limiares de tensão: 140, 120, 110, 90, 80, 50 e 10%. Dessa forma, para $x > 100$, N_i representa o número de consumidores com tensão eficaz acima de $x\%$, enquanto que para $x < 100$, N_i representa o número de consumidores com tensão eficaz abaixo de $x\%$.

Para estimar o número de consumidores que foram afetados pelo evento, a metodologia assume que todos os consumidores conectados a uma barra estão sujeitos ao mesmo nível de tensão. Em geral, não se dispõe de medidores para conhecer a tensão em todas as barras do sistema elétrico, entretanto a metodologia propõe a utilização de estimadores de estado para avaliar a tensão nas barras que não possuem medidores.

3.4.6 Método da Energia de Afundamento de Thallam

Thallam propõe a avaliação do desempenho de uma ou mais barras do sistema elétrico através do Índice de Energia do Afundamento de Tensão (W_{EAT}), que é dado pelo somatório da energia do afundamento de tensão de todos os N eventos, conforme a expressão (3.2.4), medidos durante um período de tempo. Assim,

$$W_{EAT} = \sum_{i=1}^N E_{AT}(i). \quad (3.4.9)$$

Alternativamente, o desempenho pode ser avaliado através do Índice Médio de Energia do Afundamento de Tensão (\bar{W}_{EAT}), que representa a energia média dos N afundamentos de tensão ocorridos durante um período de tempo, que pode ser calculado por:

$$\bar{W}_{EAT} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N E_{AT}(i). \quad (3.4.10)$$

3.4.7 Indicador baseado na Severidade e Frequência da Violação

Conforme exposto previamente, pode-se constatar que todos os métodos de análise de avaliação do desempenho do sistema elétrico baseiam-se na informação da magnitude e da duração do evento, sendo que a metodologia EPRI/Electrotek atribui a um mesmo evento mais de uma duração, dependendo das faixas de tensão consideradas.

O presente trabalho propõe um novo indicador que possibilite averiguar de forma mais precisa o impacto dos eventos de curta duração sobre o sistema elétrico, baseado na curva de duração por níveis do evento.

Definição

Define-se como Indicador de Frequência de Violação (IFV) o número total de eventos cuja curva de duração por níveis violou a região de tolerância de tensão da curva de sensibilidade de um determinado equipamento como, por exemplo, a ITIC.

Esse indicador pode ser dividido em dois grupos: um para afundamentos de tensão (IFV^{AT}), que contabiliza o número de eventos cuja curva de duração por níveis inferior violou o limite inferior da curva de sensibilidade do equipamento e outro para elevações de tensão (IFV^{ET}) que contabiliza o número de eventos cuja curva de duração por níveis superior violou o limite

superior da curva de sensibilidade do equipamento.

É recomendável que os resultados dos indicadores sejam apresentados por fase, pois a simples redistribuição das cargas sensíveis em uma indústria pode reduzir sensivelmente sua frequência de paradas de produção.

Entretanto, é possível expor uma informação mais compacta do que considerar individualmente a informação das três fases do evento. Pode-se contabilizar somente o evento cuja fase apresente o índice de severidade mais elevado, baseado na curva de duração por níveis. Entretanto, não é adequado agregar a informação do indicador de frequência de violações da curva de sensibilidade de afundamentos e de elevações de tensão, pois embora o índice de severidade superior seja na maioria dos casos menor que o inferior, ele representa uma situação de maior impacto sobre a carga, devido à possibilidade de danos ao equipamento.

Energia Média do Afundamento e da Elevação de Tensão

Uma outra forma de avaliar o desempenho do sistema elétrico é através da energia média não suprida pelo sistema capaz de provocar mau funcionamento ao equipamento devido aos afundamentos de tensão durante um período de tempo (\bar{S}_{cd}^{AT}) e da energia média entregue em excesso pelo sistema, capaz de causar danos ao equipamento devido às elevações de tensão durante um período de tempo (\bar{S}_{cd}^{ET}).

Dessa forma, de posse de todos os afundamentos de tensão (N_{AT}) que possuem índice de severidade inferior (S_{cd}^{inf}) maior que zero, ou seja, que podem provocar mau funcionamento ao equipamento, é possível escrever:

$$\bar{S}_{cd}^{AT} = \frac{1}{N_{AT}} \cdot \sum_{i=1}^N S_{cd}^{inf}(i). \quad (3.4.11)$$

Por outro lado, de posse todas as elevações de tensão (N_{ET}) que possuem índice de severidade superior (S_{cd}^{sup}) maior que zero, ou seja, que podem provocar danos ao equipamento, é

possível escrever:

$$\bar{S}_{cd}^{ET} = \frac{1}{N_{ET}} \cdot \sum_{i=1}^N S_{cd}^{sup}(i). \quad (3.4.12)$$

Note que diferentemente do método proposto por Thallam, o indicador de energia média não é “contaminado” com eventos que provavelmente não provocarão mau funcionamento ou danos ao equipamento.

É importante ressaltar que para subsidiar análises precisas sobre a Qualidade de Energia Elétrica, do ponto de vista de VTCD, é necessário que esses indicadores sejam calculados para os principais tipos de cargas sensíveis, cujas curvas de sensibilidade estão referenciadas em [26]. Embora esta opção requeira um maior esforço computacional, a tecnologia atual dos computadores corporativos, ou mesmo pessoais, permite realizar essa tarefa sem grandes dispêndios econômicos e de tempo.

Ademais também deve ser lembrado que os indicadores de energia podem ser recalculados (“off-line”) para diferentes curvas de sensibilidade de cargas, uma vez que as curvas de duração dos eventos estejam disponíveis através do banco de dados.

Análise dos Registros de Medição do IEEE

Na página da INTERNET sobre a revisão da recomendação “IEEE Standard 1159” [32] é possível encontrar registros reais de formas de onda de eventos de curta duração, que foram utilizados até este ponto para avaliação das técnicas de medição e proposição da nova metodologia para averiguar o impacto das VTCD sobre as cargas sensíveis e o sistema elétrico.

Como não se dispõe de informações sobre o(s) sistema(s) nos quais os dados foram obtidos, os registros de medição foram arbitrariamente colocados na base de pu, de modo que o início e o fim do evento estivessem dentro dos limites de detecção do evento e próximos ao valor unitário.

Admitindo (por conveniência) que os eventos foram monitorados em um mesmo local, torna-se possível construir uma tabela que contenha o instante de detecção, a classificação e os índices de severidade baseados na curva de duração por níveis das fases para cada um dos eventos de curta duração registrados, conforme ilustra a Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Classificação e severidade dos eventos registrados.

ID	Data e horário	Class.	Índice de Severidade Inf.			Índice de Severidade Sup.		
			Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
01	21/09/1994 07:17:44	EAMT	3,15e-3	0,0	0,0	0,0	0,0	8,26e-8
02	23/09/1994 15:40:14	AMT	2,02e-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03	30/10/1994 10:52:18	AMT	2,62e-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
04	01/12/1994 10:14:39	EAMT	8,32e-4	0,0	8,11e-4	0,0	0,0	0,0
05	06/12/1994 11:34:54	AMT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
06	08/02/1995 19:01:16	AMT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
07	01/05/1995 22:05:34	EAMT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
08	03/05/1995 08:42:39	AMT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
09	26/06/1995 21:07:17	IMT	2,01e-2	1,82e-2	5,59e-2	0,0	0,0	0,0
10	09/08/1995 12:27:37	AMT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
IFV			5	1	2	0	0	1
Energia Média			5,27e-3	1,82e-2	2,83e-2	-	-	8,26e-8

É importante ressaltar que um evento pode ter uma dupla classificação, conforme pode ser observado os eventos com identificação (ID) 1, 4 e 7. As formas de onda do evento e as curvas de valor eficaz e de duração por níveis de todos os eventos classificados na Tabela 3.8 são mostrados no Apêndice A deste trabalho.

É possível constatar que dos 10 eventos registrados, apenas 5 têm probabilidade de causar mau funcionamento ou desligamento em equipamentos de informação conforme a curva ITIC, sendo que desses, apenas um tem probabilidade reduzida de causar danos ao equipamento por sobre-tensão.

A fase C apresenta a melhor performance, seguido da fase B. Equipamentos monofásicos

e/ou bifásicos conectados à fase A poderiam ser redistribuídos com o objetivo de reduzir o número de paradas de produção. Entretanto, vale notar que esta medida teria que se basear em um histórico mais longo, pois a frequência de eventos na fase A se igualou às demais no ano de 1995.

A Tabela 3.9 mostra a frequência e a energia média dos eventos acumuladas em função de um período de tempo bi-mensal.

Tabela 3.9: Avaliação do Desempenho do Sistema Elétrico.

Mês (94/95)	Afundamentos de Tensão				Elevações de Tensão			
	Fase A	Fase B	Fase C	IFV	Fase A	Fase B	Fase C	IFV
Set-Out	1,81e-3	0,0	0,0	3	0,0	0,0	8,26e-8	1
Nov-Dez	8,32e-4	0,0	8,11e-4	1	0,0	0,0	0,0	0
Jan-Fev	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0
Mar-Abr	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0
Mai-Jun	2,01e-2	1,82e-2	5,59e-2	1	0,0	0,0	0,0	0
Jul-Ago	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0

O indicador de frequência de violações da curva ITIC para afundamentos de tensão na fase A, durante os anos de 94 e 95, é representado graficamente por:

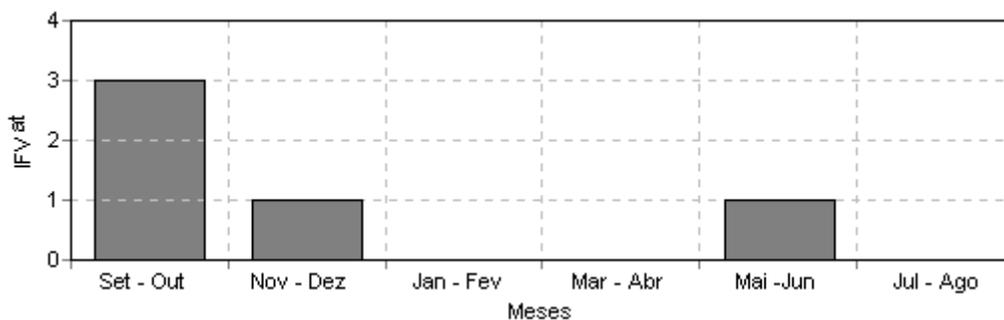


Figura 3.4.6: Indicador de Frequência de Violações para Afundamentos de Tensão na fase A.

Desse modo, é possível constatar de forma simples e objetiva que houve uma redução da frequência dos eventos que poderiam provocar paradas de produção em equipamentos de informação, referente ao ano de 94 para o de 95.

A informação da energia média dos eventos ao longo do tempo serve como parâmetro

para avaliar a eficácia de dispositivos de compensação ou atenuação do impacto das VTCD.

De outra forma, as informações da Tabela 3.9 podem ser apresentadas de forma mais compacta, considerando-se apenas os piores índices constatados nas fases, conforme mostra a Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Avaliação do Desempenho do Sistema Elétrico de forma simplificada.

Mês (94/95)	\bar{S}^{AT}	IFV ^{AT}	\bar{S}^{ET}	IFV ^{ET}
Set-Out	1,81e-3	3	8,26e-8	1
Nov-Dez	8,32e-4	1	0,0	0
Jan-Fev	0,0	0	0,0	0
Mar-Abr	0,0	0	0,0	0
Mai-Jun	5,59e-2	1	0,0	0
Jul-Ago	0,0	0	0,0	0

3.5 Conclusões

Os parâmetros de magnitude e duração do evento não permitem caracterizar adequadamente todos os tipos de eventos de curta duração que perturbam a QEE do sistema elétrico.

Um único evento pode violar o limite superior e o limite inferior da faixa de detecção de eventos na mesma fase, podendo ser classificado simultaneamente como uma elevação e um afundamento (ou interrupção) de tensão, devido à técnica de agregação temporal de eventos.

A caracterização dos eventos pode ser realizada através da perda de tensão ou da perda de energia, sendo que para eventos que não possuam a forma retangular é mais adequado calcular o valor do índice através de uma integral.

O grau de severidade de um evento pode ser obtido através de um índice que avalie a quantidade com que o evento violou a região de tolerância da curva de sensibilidade de um equipamento. O cálculo desse índice pode ser realizado através dos parâmetros de magnitude e de

duração do evento ou através da curva de duração por níveis do mesmo.

O índice de severidade do evento baseado na curva de duração por níveis quantifica a energia não suprida pelo sistema capaz de provocar mau funcionamento ou desligamento a um equipamento ou a energia entregue em excesso pelo sistema capaz de danificar esse equipamento; que é uma informação mais apropriada para avaliar o grau de severidade de qualquer tipo de evento.

O desempenho do Sistema Elétrico de Potência é normalmente avaliado em termos da frequência em que os eventos ocorrem nos pontos de medição. Em geral, a análise é realizada através dos parâmetros de magnitude e de duração do evento, que distribuem a incidência dos eventos em faixas de magnitude e de duração dos eventos com o objetivo de estabelecer formas de correlacioná-las com a vulnerabilidade das cargas em determinado ponto de medição.

Os indicadores propostos pela Detroit Edison e por Thallam apresentam os valores médios de perda de tensão e de energia dos eventos ao longo de um período de tempo, respectivamente.

O gráfico de incidência acumulada, segundo as recomendações IEEE Std 493 e IEEE Std 1346 e os indicadores SARFI baseados na curva de sensibilidade do equipamento são as metodologias baseadas nos parâmetros de magnitude e duração do evento que melhor representam o impacto destes sobre as cargas sensíveis.

O custo das perdas por paradas de produção, utilizando a metodologia proposta pela EFEI, pode ser calculado de modo mais preciso utilizando-se a caracterização do evento através da curva de duração por níveis do evento, ao invés dos parâmetros de magnitude e de duração.

O Indicador de Frequência de Violação baseado na curva de sensibilidade do equipamento permite avaliar mais fielmente o desempenho do sistema elétrico em função da sensibilidade desses equipamentos aos eventos de curta duração.

A energia média dos afundamentos de tensão e das elevações de tensão ao longo do tempo possibilita a verificação da eficácia de dispositivos de compensação ou atenuação de

impactos de distúrbios do tipo VTCD.

Embora as vantagens na análise por curvas de duração por níveis tenham sido relatadas, são necessários ensaios em laboratório e/ou acompanhamento de monitorações de rede para averiguar se a técnica proposta retrata com a devida confiança a severidade das VTCD sobre os diversos tipos de equipamentos.

O índice de severidade baseado na curva de duração por níveis permite estimar o local da origem de um evento e seu mecanismo de propagação na rede elétrica, conforme será apresentado no próximo capítulo.

Capítulo 4

Análise de Registros de VTCD

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a aplicação das metodologias de caracterização e análise das Variações de Tensão de Curta Duração propostas neste trabalho para avaliar a propagação de eventos do tipo VTCD, utilizando registros obtidos por simulação em uma rede fictícia com o programa SIMCAD [33]. Para automatizar o processo de análise e demonstrar a viabilidade da implantação das técnicas formuladas, foi desenvolvido um programa de análise de VTCD, na linguagem Borland C++ Builder 5 [34], que importa o registro das VTCD em arquivo ASCII e armazena as informações relevantes do sinal em um banco de dados relacional Paradox.

Dessa forma, o objetivo deste capítulo não é o de realizar uma análise detalhada da interação dos eventos sobre as cargas e o sistema elétrico, mas apenas de ilustrar a forma de análise de propagação de VTCD utilizando a metodologia proposta.

4.2 Sistema Elétrico de Potência

Em condições ideais os geradores de energia elétrica no Sistema Elétrico de Potência (SEP) produzem tensões senoidais trifásicas com amplitudes e frequências constantes, equilibradas e defasadas de 120° . No Brasil e Estados Unidos, as tensões alternadas trifásicas são geradas em frequência de 60 Hz e normalmente em 13,8 kV.

O transporte de energia elétrica aos centros consumidores (cargas) é realizado através de linhas de transmissão, que operam em alta tensão, com o objetivo de reduzir perdas na transmissão e diminuir a espessura dos cabos da linha de transmissão. Dessa forma, é necessário utilizar transformadores elevadores, que em grande parte possuem a conexão delta – estrela. No Brasil a transmissão de energia elétrica (CA) opera nas seguintes tensões: 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 750 kV.

A forma encontrada para aumentar a confiabilidade do sistema de transmissão e a eficiência do sistema de geração foi a de interligar os diversos sistemas elétricos, dando origem à rede básica. Essas interligações são realizadas através de transformadores com conexão estrela – estrela ou autotransformadores de modo a não inserir defasamento angular entre as tensões que constituem um laço fechado [35].

A energia elétrica antes de ser entregue aos centros consumidores é reduzida, para níveis de tensão entre 138 kV e 1 kV, através de transformadores abaixadores, que em grande parte possuem conexão delta – estrela, localizados nas subestações de distribuição sendo posteriormente transmitida (sub-transmissão) através das linhas de distribuição até as unidades consumidoras, que formam a rede primária. Os consumidores de baixa tensão recebem a energia da rede secundária em um nível de tensão mais baixo, inferior a 1 kV, através dos transformadores de distribuição.

A Figura 4.2.1 esboça o diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico de potência em função dos principais componentes da rede [6].

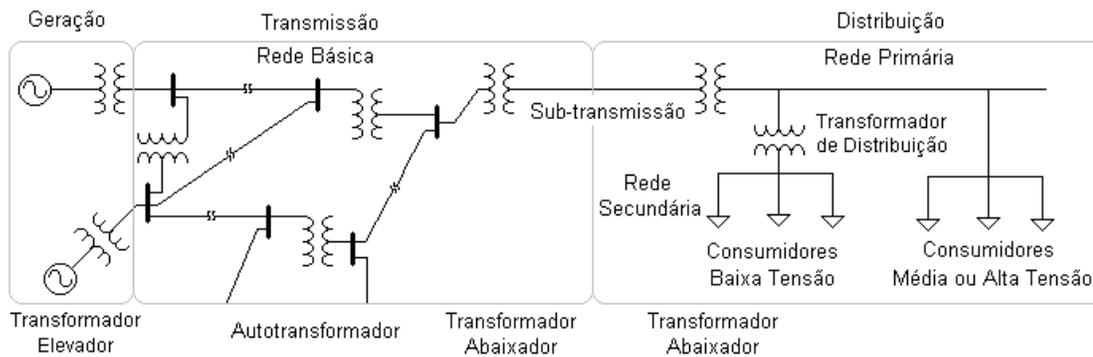


Figura 4.2.1: Diagrama unifilar simplificado do Sistema Elétrico de Potência.

Uma das desvantagens da interligação do sistema de transmissão é a propagação dos eventos por toda a rede. No momento em que uma carga de grande porte em relação ao nível de curto-circuito na rede entra em operação, ela instantaneamente é alimentada pela energia armazenada nos campos elétricos e magnéticos do sistema, provocando queda de tensão, principalmente nos pontos mais próximos da conexão dessa carga. Em seguida, essa energia passa a ser suprida pela energia cinética dos rotores dos geradores, diminuindo a velocidade das turbinas para aumentar a potência produzida, o que reduz a frequência do sistema. Dessa forma, é necessário que um ajuste no controle de carga e frequência para que o sistema retorne a operar na frequência nominal, que nas usinas hidrelétricas é realizado através do controle da vazão de água nas turbinas do gerador.

O ajuste dos níveis de tensão ao longo da rede, por sua vez, é realizado através do controle de excitação dos geradores e mudança de derivações (“tap”) de transformadores, que podem ser comutados, em alguns casos, mesmo sob cargas. A capacidade de resposta dinâmica desses dispositivos, no entanto, não evita a ocorrência de VTCD durante distúrbios provocados, como por exemplo, por faltas ou entrada/saída de cargas de grande porte. É importante ressaltar que a vantagem do sistema ser interligado está na atenuação do impacto do evento sobre o sistema elétrico [6].

Para cada tipo de estudo sobre o sistema elétrico, existe uma forma mais adequada para modelar os parâmetros dos componentes da rede elétrica (geradores, linhas, transformadores e cargas). Na análise de Variações de Tensão de Curta Duração é importante conhecer os

programa foi desenvolvido utilizando os recursos de Programação Orientada a Objetos (OOP), que facilita a “manutenção” e o reaproveitamento do código em outras aplicações [38].

A apresentação gráfica em ambiente amigável e a ordenação automática dos registros segundo a data ou grau de severidade do evento reduzem sobremaneira o tempo de análise desses registros.

A Figura 4.3.1 mostra a tela principal do programa desenvolvido para realizar análises dos registros de VTCD. Como é possível observar, os registros foram ordenados pela data e horário da captura do evento, embora pudessem ser ordenados pelo índice de severidade do evento.

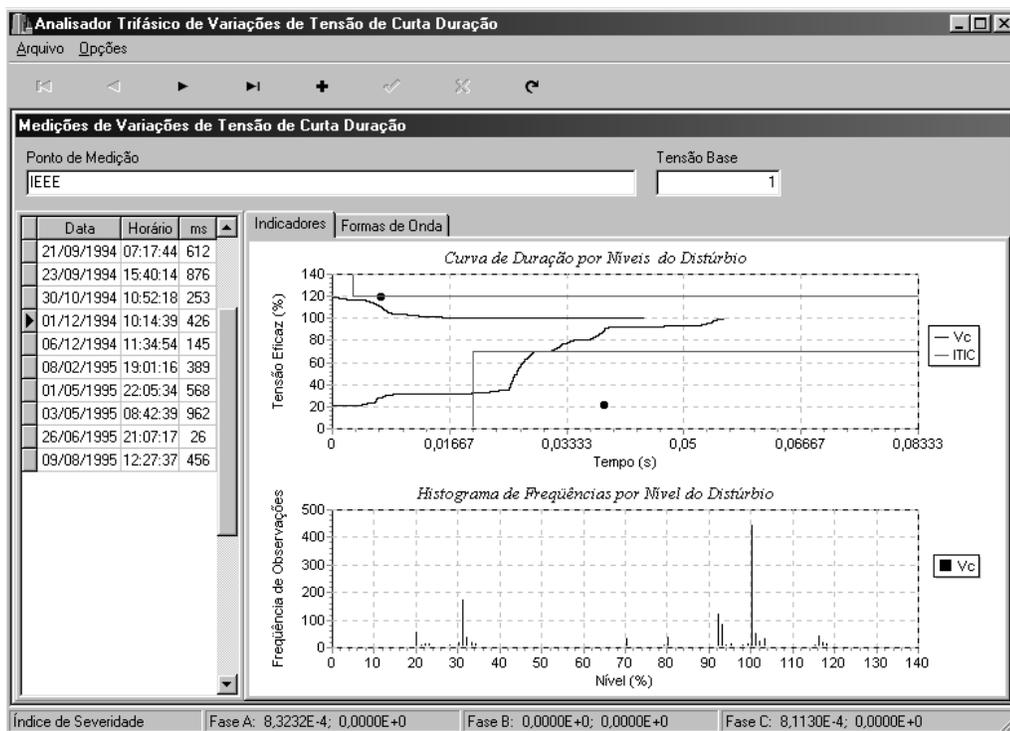


Figura 4.3.1: Analisador Trifásico de Variações de Tensão de Curta Duração.

A ordenação dos registros de medição através do índice de severidade do evento, baseado na curva de sensibilidade de equipamentos de informação (ITIC), não oferece bons resultados. Entretanto, a ordenação desses registros pelo índice de severidade baseado nas curvas dos limites de detecção do evento realiza essa tarefa de modo mais apropriado.

Os registros de medição podem ser importados pelo programa individualmente ou conjuntamente, dependendo somente da estrutura em que estão organizados os dados. Ao se abrir arquivos com as formas de onda dos eventos, são armazenados em uma tabela a data e horário das ocorrências e um código individual. Os valores eficazes da tensão nas três fases são calculados e classificados continuamente, de forma a construir o histograma de frequências por nível. No final desse processo, são armazenados os histogramas das três fases em uma nova tabela com o código da ocorrência a que pertencem. Com base no histograma são calculados simultaneamente os valores dos índices de severidade do evento para cada uma das fases que são armazenados em uma nova tabela, ou, opcionalmente, em outros campos na tabela que contém a data e horário do evento.

4.3.2 Armazenamento dos dados em arquivo

Os registros das formas de onda de tensão do evento nas três fases são armazenados em um arquivo binário, reduzindo o tamanho dos arquivos. Poderiam ser utilizadas ferramentas de compactação de arquivos, como por exemplo, os programas ARJ ou Winzip, para reduzir ainda mais o tamanho do arquivo. Entretanto, é mais apropriado desenvolver um algoritmo de compactação de dados utilizando a Transformada de Wavelet para aperfeiçoar ainda mais o sistema de análise proposto. É necessário ressaltar que armazenar somente o histograma de frequências por nível do evento é mais econômico, caso não seja necessário identificar o elemento causador através dos registros das VTCD.

Foram simulados um total de 6 eventos baseados na rede proposta para avaliação da propagação de eventos, ilustrada na Figura 4.2.2. O programa SIMCAD gera um arquivo ASCII com os registros das formas de onda do evento. No total, foram gerados 36 arquivos de registros da forma de onda de tensão das fases A, B e C, com um tamanho total de 8809913 bytes para armazenamento em arquivo ASCII, enquanto que foram usados 8003376 bytes para armazenamento em arquivo binário, ou seja, houve uma redução no tamanho do arquivo de aproximadamente 10% para armazenar a mesma forma de onda de tensão do sinal. Entretanto, armazenar somente o histograma de observações por nível é bem mais econômico, pois o banco

de dados armazena somente 239616 bytes, ou seja, reduz em 97% a quantidade de informação armazenada. Neste caso, no entanto, não é possível reconstruir a forma de onda de tensão da VTCD.

4.3.3 Classificação Automática de Eventos

Um único evento pode possuir dupla classificação, pois a agregação temporal de eventos possibilita a violação dos dois limites de detecção de eventos. Dessa forma, é necessário desenvolver um algoritmo de classificação dos eventos baseado em seu histograma de frequência por níveis. Esta tarefa pode ser realizada de forma simples quando os dados dos histogramas estão guardados em uma tabela do banco de dados relacional.

Os eventos classificados como elevações momentâneas de tensão (EMT) podem ser identificados realizando uma consulta que selecione apenas os eventos que apresentem de um ciclo a três segundos de amostras com nível de tensão superior a 110% e que não possuam qualquer amostra abaixo do nível 10%, nem um ciclo de amostras abaixo do nível 90%. Já os eventos classificados como elevações e interrupções momentâneas de tensão (EIMT) podem ser identificados realizando uma consulta que selecione apenas os eventos que possuam entre um ciclo a três segundos de amostras com nível de tensão superior a 110% e que possuam entre uma amostra a três segundos de amostras com nível de tensão abaixo de 10%. Caso algum destes níveis apresente número de amostras superior a 3s e inferior a 1 minuto, o evento é classificado como temporário. De forma análoga, pode-se construir as demais classificações.

4.3.4 Análise dos Registros de VTCD

A análise de registros de medição para a avaliação do desempenho do sistema elétrico foi suficientemente explorada no capítulo anterior, através do indicador de frequência de violação da curva de sensibilidade de equipamentos.

O estudo da propagação de eventos pode ser simplificado através da utilização de uma tabela que contenha em cada um dos registros os códigos dos eventos que ocorreram em horários

próximos, nos diferentes pontos da rede, tornando possível o processo de automatização da análise de severidade de um evento em diversos pontos da rede elétrica, permitindo realizar a avaliação da propagação do evento.

4.4 Estudo do Mecanismo de Propagação das VTCD

As VTCD podem ser causadas por faltas (curto-circuito), conexão ou desconexão de cargas de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local e pela entrada ou saída de bancos capacitivos.

Uma falta na rede elétrica pode provocar a interrupção de tensão nos circuitos localizados próximos à sua origem [39], e dependendo da operação da proteção e da impedância do curto-circuito, ela pode provocar afundamentos de tensão ou elevações de tensão em circuitos em locais mais distantes ao ponto de origem da falta.

Dessa forma, a classificação correta dos eventos de curta duração dá subsídios para análises mais detalhadas sobre o mecanismo de propagação das VTCD.

Para fins de ilustração do estudo de propagação de eventos, serão mostradas as curvas resultantes da simulação de uma falta trifásica desequilibrada para o neutro no ponto 3, próxima ao reator, na rede elétrica mostrada na Figura 4.2.2.

4.4.1 Interrupções de Tensão

As interrupções de tensão geralmente são associadas à faltas no sistema elétrico, embora possam ocorrer devido às falhas em equipamentos ou problemas de controle. Normalmente, essas faltas são monofásicas e ocorrem para a terra (neutro).

A Figura 4.4.1-(a) mostra as curvas de forma de onda de tensão do evento devido a uma falta trifásica sobre a barra 3, simulada no programa SIMCAD.

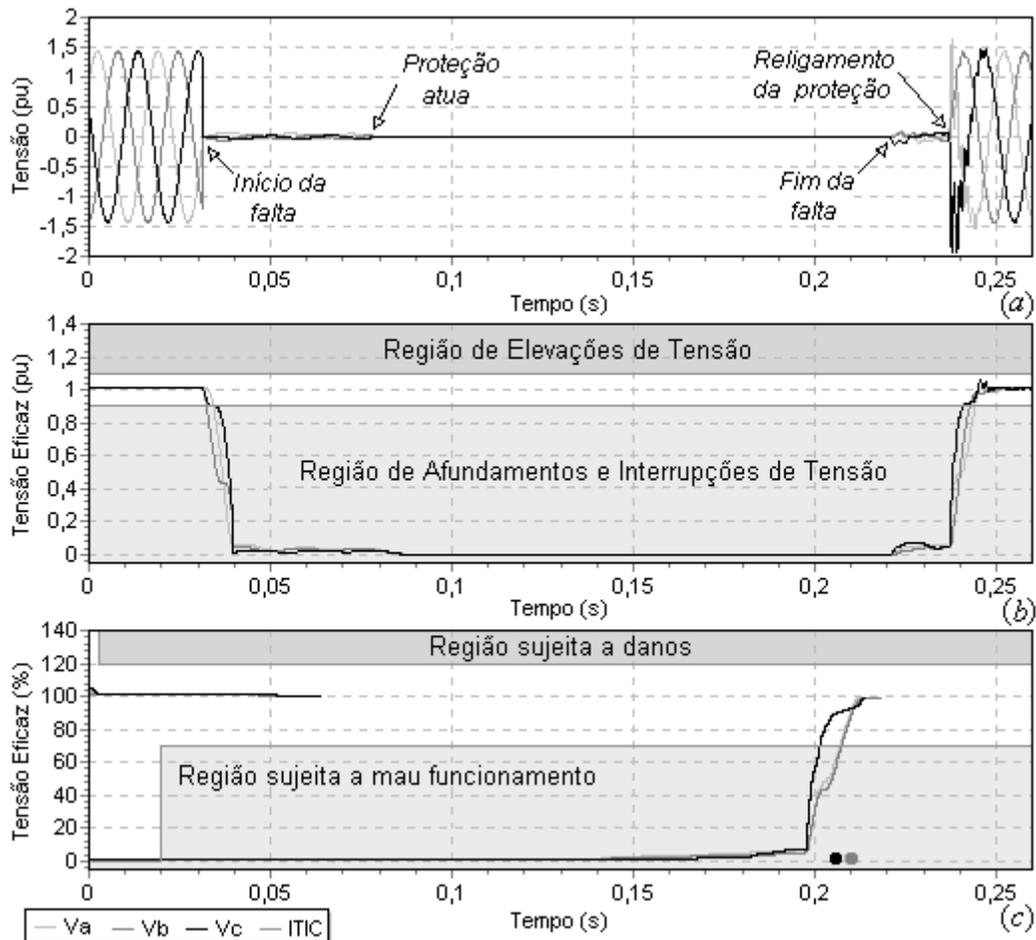


Figura 4.4.1: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis da interrupção momentânea de tensão medida na barra 3 do sistema.

É possível observar os instantes de atuação da proteção, que foram ajustados com os tempos típicos para o desligamento e o re-ligamento do circuito no ponto da falta para um sistema de sub-transmissão [5]. Notar que somente após a atuação da proteção o nível de tensão na barra 3 cai a zero, o que se deve ao corte do fornecimento de energia do sistema de sub-transmissão. Após a extinção da falta pode ser observado que ainda existe tensão na barra 4 do circuito, pois o motor trifásico continua com tensão residual. Já a distorção da forma de onda de tensão registrada após religamento da proteção ocorre em função da energização dos bancos capacitivos conectados à rede nas barras 3 e 4.

Como a configuração desta parte da rede é radial e a conexão dos transformadores é Y-Y,

a barra 4, a jusante da barra do curto, está sujeita ao mesmo “perfil” de interrupção de tensão registrado na barra 3, conforme pode ser constatado na Figura 4.4.2. Entretanto, observa-se que o motor presente na barra 4 atenua a falta de suprimento de energia, reduzindo a variação brusca do valor eficaz da tensão registrada no início da falta.

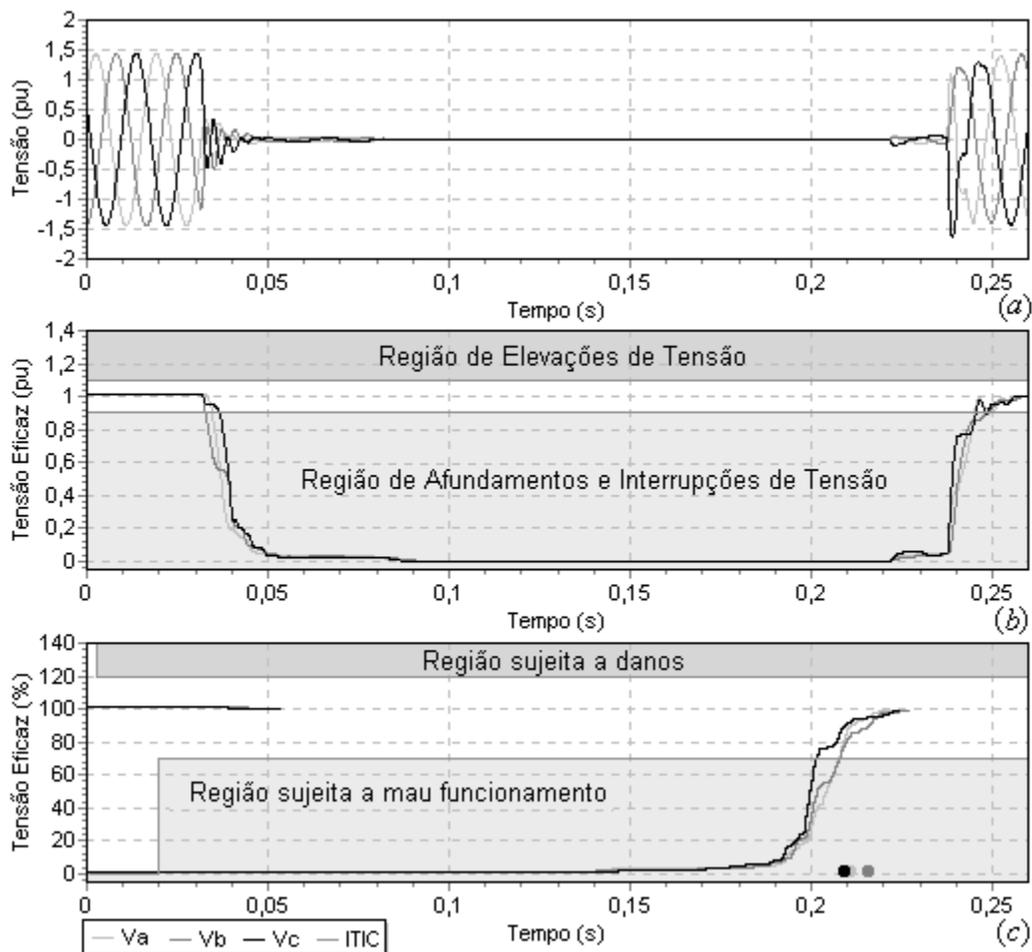


Figura 4.4.2: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis da interrupção momentânea de tensão medida na barra 4 do sistema.

Como a área de violação da curva de duração por níveis é grande, provavelmente todos os equipamentos sensíveis, exceto os que são protegidos por dispositivos do tipo UPS (“Uninterruptible Power Supplies”), conectados à barra 4 sofrerão desligamentos e as demais cargas poderão estar sujeitas a mau funcionamento, causando perdas em ambiente industriais, comerciais e/ou residenciais.

4.4.2 Afundamentos de Tensão

Os afundamentos de tensão, da mesma forma que as interrupções de tensão, geralmente são causados por faltas, que ocorrem em locais remotos, isoladas pelos dispositivos de proteção. Também podem ser causadas pela conexão de cargas ou pela partida de motores de grande porte em relação ao nível de curto-circuito local.

A Figura 4.4.3 ilustra essa situação, onde o curto-circuito na barra 3 provocou um afundamento momentâneo de tensão na barra 2 do sistema, a montante da barra com defeito.

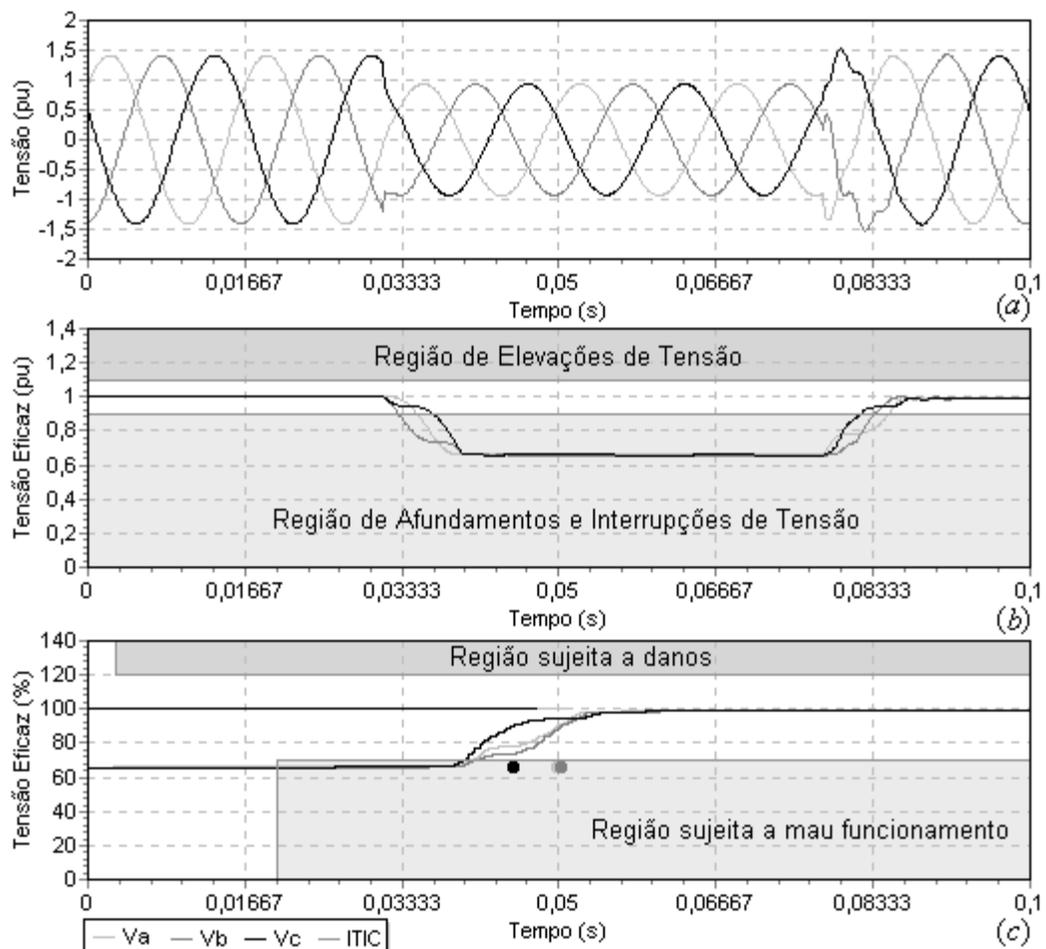


Figura 4.4.3: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do afundamento momentâneo de tensão registrado na barra 2 do sistema.

É possível constatar que a proteção não isolou a falta em tempo hábil para que o evento

(curva de duração por níveis) não violasse a região de tolerância de equipamentos de informação. Por outro lado, pode-se dizer que a interligação do sistema foi capaz de atenuar o impacto da falta, devido à presença do equivalente de cargas girantes na barra 6, conforme se pode constatar na parte (c) da Figura 4.4.3.

Diferentemente da barra 2, que teve um nível de tensão precário durante o evento, a barra 1 manteve-se operando em um nível de tensão adequado, conforme é possível observar na parte (c) da Figura 4.4.4, que deve-se em grande parte à proximidade do sistema de geração desta barra, apesar de também poder haver uma contribuição do equivalente das cargas girantes na barra 6.

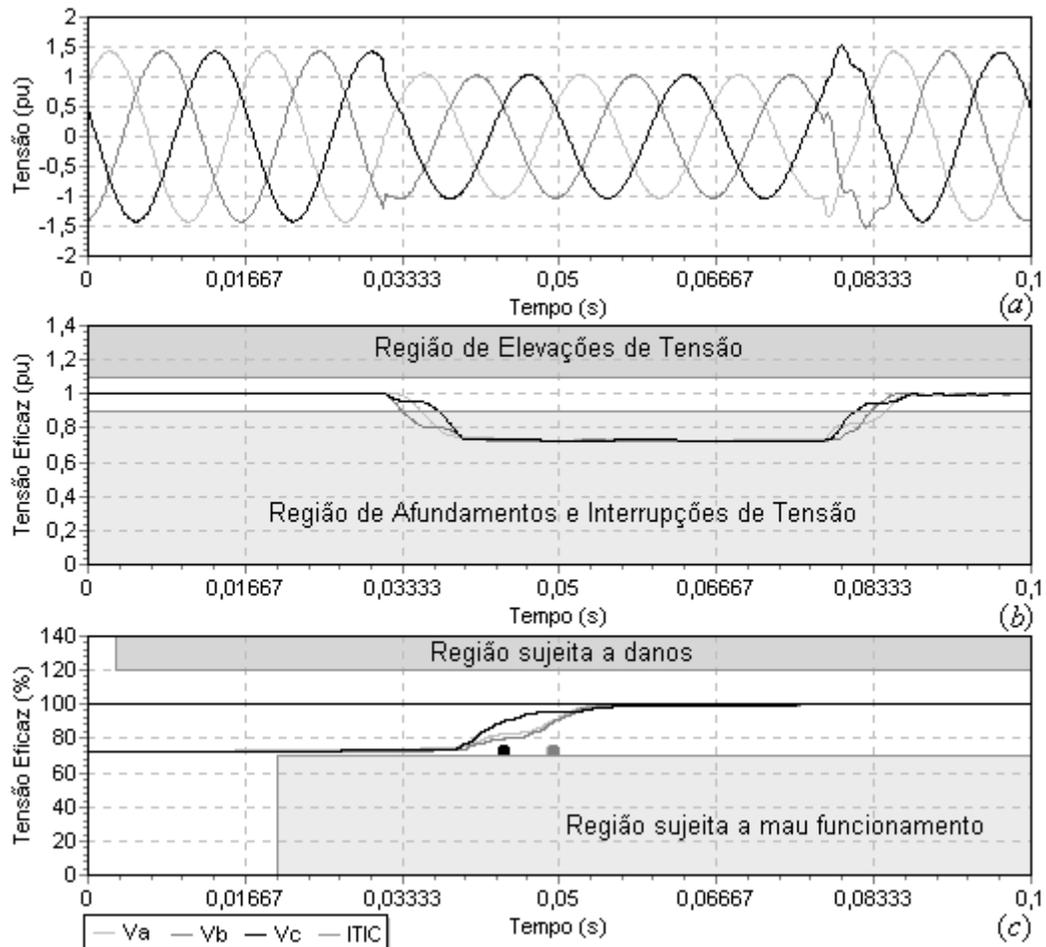


Figura 4.4.4: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis de afundamento momentâneo de tensão registrado na barra 1 do sistema.

4.4.3 Elevações de Tensão

As elevações de tensão também são associadas a condições de falta no sistema elétrico, embora sejam menos comuns de ocorrerem. Também podem ser causadas pela desconexão de cargas de grande porte do sistema ou chaveamento de bancos capacitivos de grande porte.

A Figura 4.4.5 ilustra um evento que poderia ser classificado como elevação momentânea de tensão caso o tempo em que a tensão eficaz ficou acima do nível 110% fosse maior que um ciclo. Assim, esse evento é classificado somente como um afundamento momentâneo de tensão.

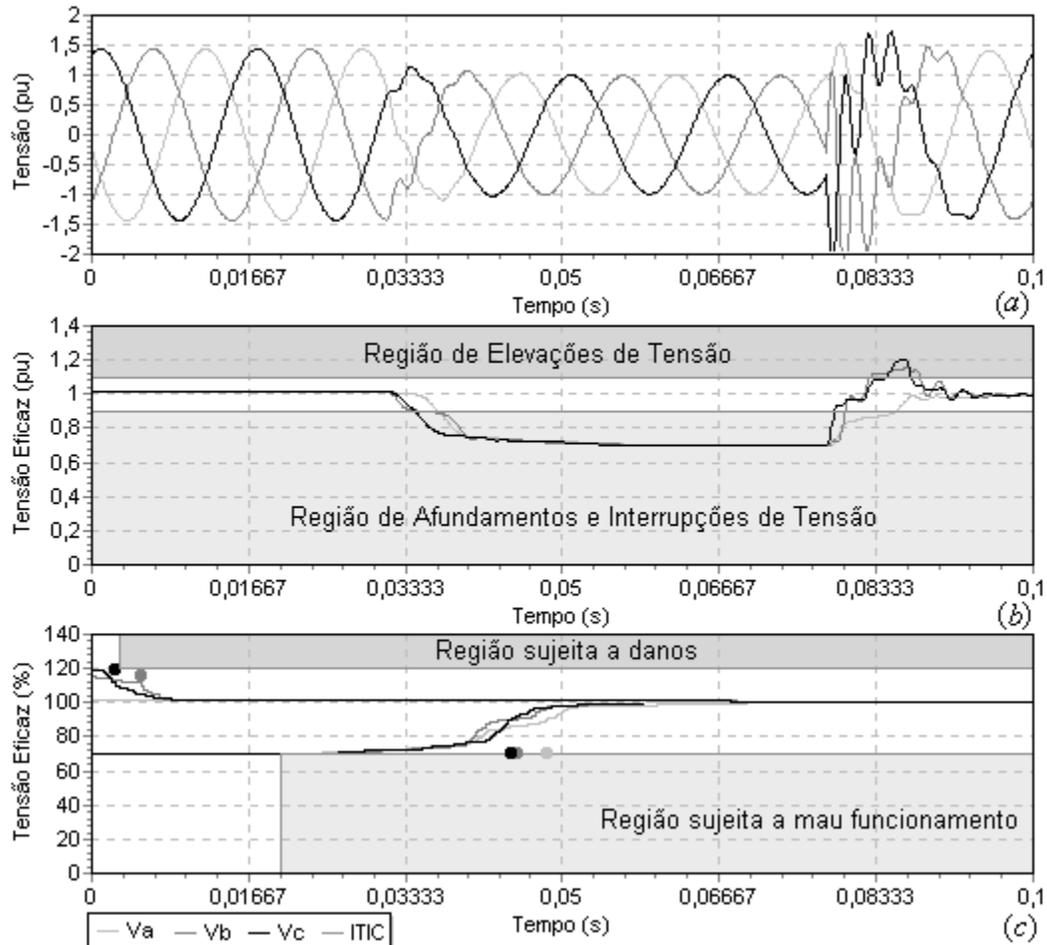


Figura 4.4.5: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis de um afundamento momentâneo de tensão seguido de um “aumento” de tensão na barra 6.

Como o evento (curva de duração por níveis) não viola a região de tolerância de tensão, os equipamentos conectados a esta barra provavelmente não estarão sujeitos a mau funcionamento. Da mesma forma, a tensão na barra 5 é mantida em um nível de tensão adequado durante o evento, conforme pode ser constatado na Figura 4.4.6, embora os parâmetros de magnitude e de duração da elevação de tensão da fase B violem a região de tolerância da curva ITIC.

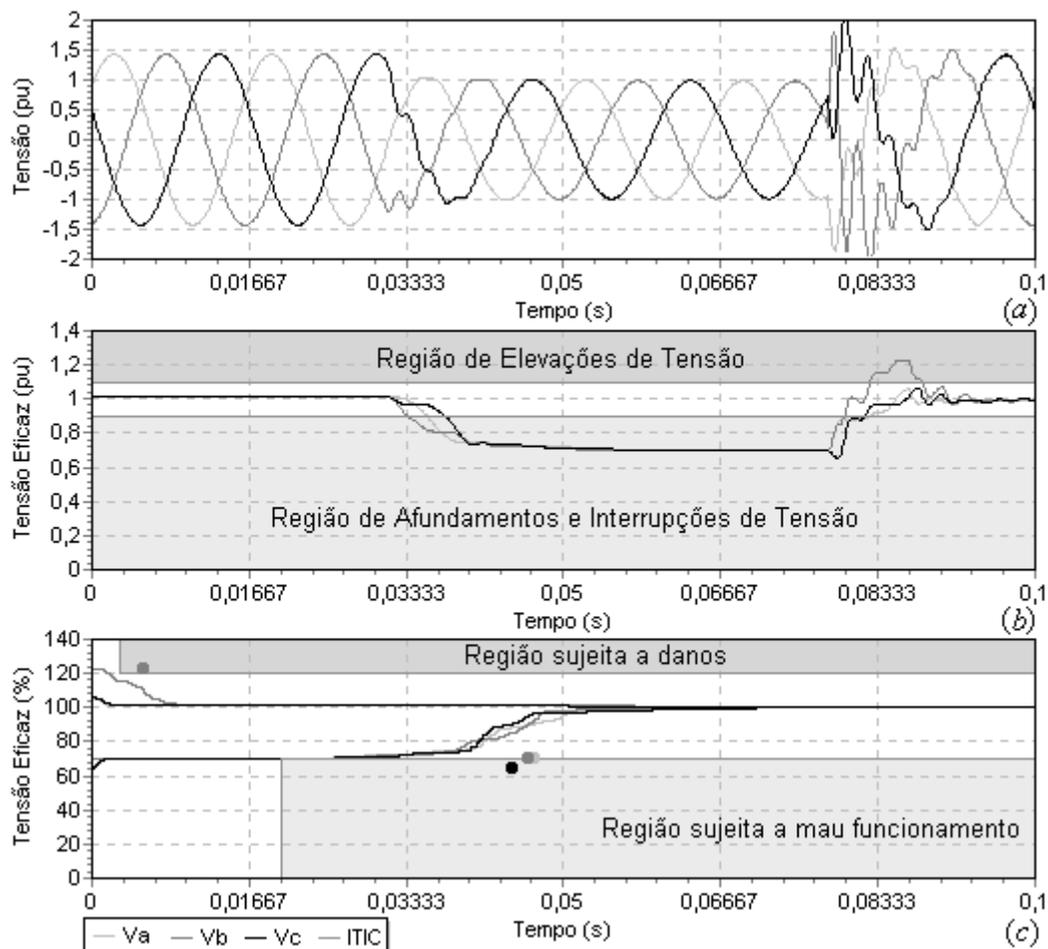


Figura 4.4.6: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis de um afundamento momentâneo de tensão seguido de um “aumento” de tensão na barra 5.

Do mesmo modo que o evento anterior, este é classificado como um afundamento momentâneo de tensão, pois novamente o tempo em que o evento fica acima do nível 110% é inferior a um ciclo.

A elevação de tensão registrada nas barras 5 e 6 deve-se à desconexão das cargas presentes na barra 3, em função da atuação da proteção, fazendo com que o banco capacitivo da barra 6 provoque uma elevação de tensão.

Comparando a Figura 4.4.5 com a Figura 4.4.6 é possível observar um defasamento angular entre as formas de onda de tensão, que se deve à conexão Δ -Y do transformador abaixador localizado entre as barras 5 e 6. Após a atuação da proteção, a relação fasorial entre as tensões resulta em uma elevação de tensão significativa na fase B da barra 5 e uma diminuição na fase C. Dessa forma, é imprescindível levar em conta o tipo de conexão entre os transformadores para avaliar a propagação das VTCD.

4.4.4 Propagação dos Eventos

A forma de propagação dos eventos na rede elétrica depende da dinâmica de interação entre as cargas e a tensão de suprimento. É esperado que no ponto de origem do evento a curva de duração por níveis viole mais significativamente curva de sensibilidade de equipamentos, no caso, de informação (ITIC), que pode ser traduzido por um maior índice de severidade do evento. Entretanto, a conexão Δ -Y entre os enrolamentos dos transformadores pode alterar significativamente o índice de severidade, podendo torná-lo até mesmo maior que o do ponto de origem do evento.

A Tabela 4.1 mostra a classificação e índices de severidade da falta simulada na barra 3.

Tabela 4.1: Classificação e severidade dos eventos registrados.

Barra	Class.	Índice de Severidade Inferior (pu)			
		Fase A	Fase B	Fase C	Pior índice
01	AMT	0,0	0,0	0,0	0,0
02	AMT	3,21e-5	4,71e-5	3,65e-5	4,71e-5
03	IMT	8,53e-2	8,61e-2	8,55e-2	8,61e-2
04	IMT	8,49e-2	8,49e-2	8,41e-2	8,49e-2
05	AMT	0,0	0,0	0,0	0,0
06	AMT	0,0	0,0	0,0	0,0

Como é possível observar, o ponto 3 apresenta o maior índice de severidade para a coluna

de “Pior Índice”, indicando que provavelmente este é o ponto de origem do evento, embora o ponto 4 também devesse ter sido levado em conta. Retornando à informação por fase, é possível constatar que os índices de severidade do evento para as três fases apresentam valores muito próximos, o que induz a caracterizar o evento como trifásico.

O conhecimento sobre a topologia e configuração da rede elétrica, permite realizar análises mais precisas sobre a propagação e localização da origem do evento. No exemplo, a presença do motor e do banco capacitivo na barra 4, melhorou os índices de severidade dessa barra a jusante do ponto da falta.

A Tabela 4.2 apresenta a classificação e o índice de severidade de uma falta monofásica simulada no meio da linha de transmissão entre as barras 1 e 2, cujas formas de onda são apresentadas no Apêndice B.

Tabela 4.2: Classificação e severidade dos eventos registrados.

Barra	Class.	Índice de Severidade Inferior (pu)			
		Fase A	Fase B	Fase C	Pior índice
01	IMT	1,08e-1	8,61e-2	8,56e-2	1,08e-1
02	IMT	1,32e-2	0,0	0,0	1,32e-2
03	IMT	1,18e-2	0,0	0,0	1,18e-2
04	AMT	8,56e-3	4,10e-6	2,53e-5	8,56e-3
05	AMT	8,23e-3	0,0	0,0	8,23e-3
06	AMT	1,47e-3	0,0	1,37e-3	1,47e-3

Pela coluna do “pior índice”, é possível constatar que a barra 1 apresenta o grau mais elevado de impacto sobre o sistema, tornando-a a mais provável como origem do evento. Comparando o índice de severidade das fases dessa barra, é possível dizer que o evento é do tipo monofásico e ocorreu na fase A.

Desse modo, devem ser considerados para fins de investigação da localização da origem do evento, a conexão dos transformadores e as cargas conectadas ao barramento.

4.5 Conclusões

O mecanismo de propagação das VTCD sobre o sistema elétrico depende de diversos fatores, como por exemplo, da topologia, carregamento e nível de curto circuito do sistema elétrico, conexão dos transformadores, do ajuste do sistema de proteção e do tipo de evento.

Um dos problemas da interligação do sistema elétrico é a propagação dos eventos por toda a rede, entretanto essa distribuição possibilita a atenuação do impacto do evento sobre o sistema, devido à maior quantidade de energia disponível nos campos elétricos e magnéticos da rede e/ou da possibilidade da energia ser suprida por outras linhas que não foram desconectadas do sistema pela atuação dos dispositivos de proteção.

A ordenação dos registros dos eventos detectados é mais apropriada usando o índice de severidade baseado nas curvas dos limites de detecção do evento, ou seja, através da energia associada à área de violação da faixa de detecção do limite superior e inferior.

O banco de dados relacional permite realizar consultas nas tabelas separando as interrupções, afundamentos e elevações de tensão, organizar os registros segundo o grau de severidade do evento ou do instante de sua ocorrência e avaliar a evolução dos indicadores para VTCD ao longo do tempo.

As técnicas e metodologias para a caracterização e análise de VTCD foram implementadas com sucesso no ambiente de programação Borland C++ Builder 5, utilizando recursos de programação orientada a objetos e banco de dados relacional.

As Variações de Tensão de Curta Duração são geralmente provocadas por faltas monofásicas para a terra. Em virtude dos dispositivos de proteção, da interligação entre sistemas e dos elementos que compõem a rede, uma falta (mono, bi ou trifásica) pode provocar interrupções, afundamentos ou elevações de tensão em diferentes pontos do sistema elétrico, conforme a sua localização em relação à origem do evento e topologia da rede (radial ou anel).

A classificação e caracterização do evento podem ser feitas de forma eficiente utilizando

a curva de duração por níveis do evento.

A localização da origem do distúrbio pode ser “estimada” através do índice de severidade. Entretanto é necessário conhecer a topologia da rede, tipo de conexão dos transformadores, configuração das cargas mais importantes para o sistema, para que seja possível avaliar adequadamente a propagação de eventos sobre a rede elétrica.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões Finais

O estudo das metodologias tradicionais, relacionadas com o tema deste trabalho, revelou que estas buscam caracterizar a severidade dos eventos apenas em função de dois parâmetros: magnitude e duração.

No entanto, existem evidências claras de que essa abordagem simplificada não atende às necessidades das indústrias e dos consumidores em geral. É notório, por exemplo, o impacto que pequenas “piscadas” da rede de alimentação podem causar sobre um equipamentos de computação.

Seria esperado, que em plena era da informática, a monitoração de distúrbios em pontos remotos do sistema elétrico, utilizasse as técnicas de processamento digital de sinais para a análise e a transmissão de dados.

As recomendações e normas atuais para verificar a severidade dos distúrbios, e que são baseadas em curvas-guia como, por exemplo, CBEMA, ITIC ou outra curva de sensibilidade de cargas, permitem uma abordagem muito mais elaborada do que a simples verificação da conformidade em termos da magnitude e da duração do evento. Isto significa que antes de propor modificações dessas normas, há que se propor metodologias mais elaboradas para a quantificação do grau de severidade do evento.

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a construção da curva de duração por níveis, aplicável a cada distúrbio detectado, e que permite uma verificação direta da severidade do evento em relação a uma curva-guia, usada como referência.

Conforme mostrado no Capítulo 3, a curva de duração por níveis é construída a partir da codificação das amostras de tensão eficaz em histogramas de frequência por níveis de tensão. Essa técnica representa uma compactação de dados com perda do vínculo temporal das amostras. No entanto, os resultados demonstram que a curva de duração por níveis contém as informações necessárias para avaliar o impacto do evento sobre cargas sensíveis.

Com base nas curvas de duração por nível, consegue-se extrair informações sobre a energia entregue em excesso ou em falta, capaz de provocar a violação da faixa de tolerância de tensão, considerando a curva-guia como referência.

Comparando-se os níveis de energia em excesso ou em falta, resultantes para as diferentes fases e pontos da rede, pode-se estimar o tipo e o local de origem do distúrbio, bem como o mecanismo de propagação do evento através do sistema.

O registro de ocorrências de violação constatados em um ponto de observação ao longo de um período de tempo permite contabilizar a frequência de interrupções efetivas de processos produtivos, que é uma informação de grande interesse para os consumidores, pois expressa o seu grau de vulnerabilidade e permite estimar os custos das paradas de produção provocadas pela rede.

5.2 Trabalhos Futuros

A principal limitação do método proposto, baseado na curva de duração por níveis, está na perda do vínculo temporal das amostras de tensão processadas na construção do histograma de freqüências por nível do evento.

Com o objetivo de manter o elevado grau de compactação de dados referente aos eventos detectados e processados remotamente, reduzindo a quantidade de dados a ser transmitida para uma unidade central de armazenamento e de análises posteriores, sem perder o vínculo temporal, existe a possibilidade de se desenvolverem técnicas de codificação reversível baseada na Transformada de Wavelets.

Essas técnicas recentes, que estão começando a ser aplicadas ao sistema elétrico, serão objeto de estudos futuros a serem incorporados no sistema de análise desenvolvido. Através dessas técnicas, os registros das formas de onda dos eventos poderão ser compactados e transmitidos diretamente para a unidade central.

Independente da técnica de compactação dos registros dos eventos, será necessário implementar equipamentos de baixo custo e de grande confiabilidade, que explorem os recursos de processamento digital. Para isso, é essencial desenvolver interfaces que não degradem o sinal analógico face às interferências eletromagnéticas associadas aos próprios distúrbios.

É recomendável também, como trabalho futuro, aferir o desempenho da metodologia proposta em medições de campo, por exemplo, na monitoração de instalações industriais com cargas sensíveis.

Bibliografia

- [1] Stones, J.; Collinson, A. “Power Quality”. Power Engineering Journal, v. 15, nº 2, p. 58 - 64, abril, 2001.
- [2] Chowdhury, B. H. “Power Quality”. IEEE Potentials, v. 20, nº 2, p. 5 - 11, abril-maio, 2001.
- [3] Deckmann, S. M. “Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica”. Curso de Extensão, 2001 – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [4] Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos - IEEE. “IEEE Standard 1159: IEEE Recommended Practice Monitoring Electric Power Quality”. New York: 1995. ISBN: 1-55937-549-3.
- [5] Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Beaty, H. W. “Electrical Power Systems Quality”. New York: Ed. McGraw-Hill, 1996. ISBN 0-07-018031-8.
- [6] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. “Resolução nº 505”. Regulamentada em 26 de novembro de 2001. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.
- [7] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. “Padrões de Desempenho da Rede Básica – Submódulo 2.2”, versão aprovada pelo conselho administrativo em outubro de 2000. Disponível em: <http://www.ons.org.br>.
- [8] Ribeiro, T. N.; Mertens, E.; Brasil, D. O. C.; Correia, D. M. “Variações de Tensão de Curta Duração – Esforços Conjugados do ONS, ANEEL e Agentes”. Anais do IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica – SBQEE, Porto Alegre: PUCRS, 2001. p. 409-414. ISBN: 85-7430-225-2.

-
- [9] Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos - IEEE. "IEEE Standard 446: IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications". New York: 1987. ISBN: 1-55937-969-3.
- [10] Koval, D. O. "Computer Performance Degradation due to their susceptibility to power supply disturbances". Industry Applications Society Annual Meeting, p. 1754-1760, 1989.
- [11] ITI (CBEMA) curve Application Note. "Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council". Disponível em: <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>.
- [12] Thallam, R. S.; Heydt, G. T. "Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense", IEEE PES & IAS Task Force P1564 - Voltage Sag Indices. Disponível em: <http://grouper.ieee.org/groups/sag/documents.html>.
- [13] Styvaktakis, E.; Bollen, M.; Gu, I. Y. H. "Classification of Power System Events: Voltage Dips", IEEE Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP, p. 745-750, 2000.
- [14] Bollen, M. "Voltage Sags Indices – Draft 2", IEEE PES & IAS Task Force P1564 - Voltage Sag Indices. Disponível em: <http://grouper.ieee.org/groups/sag/documents.html>.
- [15] Tunaboylu, N. S.; Collins, E. R.; Chaney, P. R. "Voltage Disturbance Evaluation Using the Missing Voltage Technique", IEEE Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP, p. 577–582, 1998.
- [16] Deckmann, S. M. "Variações Momentâneas de Tensão – Relatórios 5 e 6". Estudos sobre Qualidade de Energia Elétrica, maio e julho, 2000.
- [17] Kagan, N. et al. "Proposta de Indicadores para a Fiscalização Estatística dos Fenômenos de VMT – Produto G". Projeto de Mapeamento de Fenômenos relativos à Qualidade do Produto no Sistema Elétrico. Ref. USPQ-NT07. USP e Eletropaulo, março, 2000.
- [18] Ramos, A. J. P. "Monitoração, Avaliação e Controle da Qualidade de Energia Elétrica". Relatório Parcial 2: Protocolo de medição e monitoração, maio, 2000.
- [19] Deckmann, S. M. "Tensão de Suprimento – Indicadores de Avaliação – Relatório 4". Estudos sobre Qualidade de Energia Elétrica, abril, 2000.
- [20] Ferreira, A. A.; Castro, G. P. B.; Deckmann, S. M.. "Monitoramento de Variações Momentâneas de Tensão". Anais do IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica – SBQEE, Porto Alegre: PUCRS, 2001. p. 391-396. ISBN: 85-7430-225-2.
- [21] Reisdorph, K. "Teach Yourself Borland C++ Builder 3 in 21 Days". Indianapolis: Ed. Sams Publishing, 1998. ISBN 0-672-31266-2.

-
- [22] Ribeiro, M. V. “Compressão de Dados aplicada a Qualidade de Energia Elétrica usando a Transformada de Wavelet”. Monografia – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, agosto, 1999.
- [23] Brooks, D. L.; Dugan, R. C.; Waclawiak, M.; Sundaram, A. “Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance”, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, nº 1, p. 254 - 259, janeiro, 1998.
- [24] Bollen, M; Gu, I. Y. H. “Voltage Sag Indices – Draft 2”, Voltage Sag Indices Task Force - P1564. Novembro, 2001.
- [25] Dettloff, A.; Sabin, D. “Power Quality Performance of the Special Manufacturing Contracts between Power Provider and Customer”, Proceedings. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. vol. 2, p. 416-424, 2000.
- [26] Thallam, R. S.; Heydt, G. T. “Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense”, Voltage Sag Indices Task Force - P1564.
- [27] ÁFRICA DO SUL. NRS-048-2. “Electricity Supply – Quality of Suplly. ”, Part 1: Minimum Standards, For application by the National Electricity Regulator. 1º ed., 1996. ISBN 0-626-11070-X.
- [28] Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos - IEEE. “IEEE Standard 493: IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Comercial Power Systems”. Dezembro, 1997.
- [29] Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos - IEEE. “IEEE Standard 1346: IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power Systems Compatibility and Electronic Process Equipment”. maio, 1998.
- [30] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. “Estado da Arte de Indicadores para Afundamentos de Tensão”. Grupo de Qualidade de Energia Elétrica – Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), julho, 2001. Documento: ONS-2.1-022/2001.
- [31] McGranaghan, M. “Trends in Power Quality Monitoring”. IEEE Power Engineering Review, v. 21, nº 10, p. 3 - 9, outubro, 2001.
- [32] Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos - IEEE. “IEEE Task Force P1159 - Monitoring Electric Power Quality”. Fevereiro, 2002. Disponível em <http://grouper.ieee.org/groups/1159/2/testwave.html>.
- [33] SIMCAD versão 4.01^a: Powersim Technologies Inc., 1995. Disponível em: <http://www.powersimtech.com>.
- [34] Borland C++ Builder versão 5.0: Inprise Corporation, 2000. Disponível em: <http://www.borland.com>.

-
- [35] Sato, F. “Cálculo de Curto Circuito em Sistemas de Energia Elétrica”. Curso de Pós-Graduação, 2001 – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <http://baiacu.dsee.fee.unicamp.br/~sato>.
- [36] Monticelli, A.; Garcia, A. “Introdução a Sistemas de Energia Elétrica”. Campinas: Editora da UNICAMP, 2000. ISBN: 85-268-0487-1.
- [37] Dranetz-BMI. “The Dranetz-BMI Handbook for Power Quality Analysis”.
- [38] Schildit, H. “Borland C++: Completo e Total”. São Paulo: Makron Books, 1997. ISBN do livro original (“The Complete Reference Borland C++”): 85-346-0813X.
- [39] McGranaghan, M.; Mueller, D. R.; Samotyj, M. J. “Voltage Sags in Industrial Systems”. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 29, n° 2, p. 397 - 403, março/abril, 1993.

Apêndice A

Caracterização de eventos extraídos do IEEE [32]

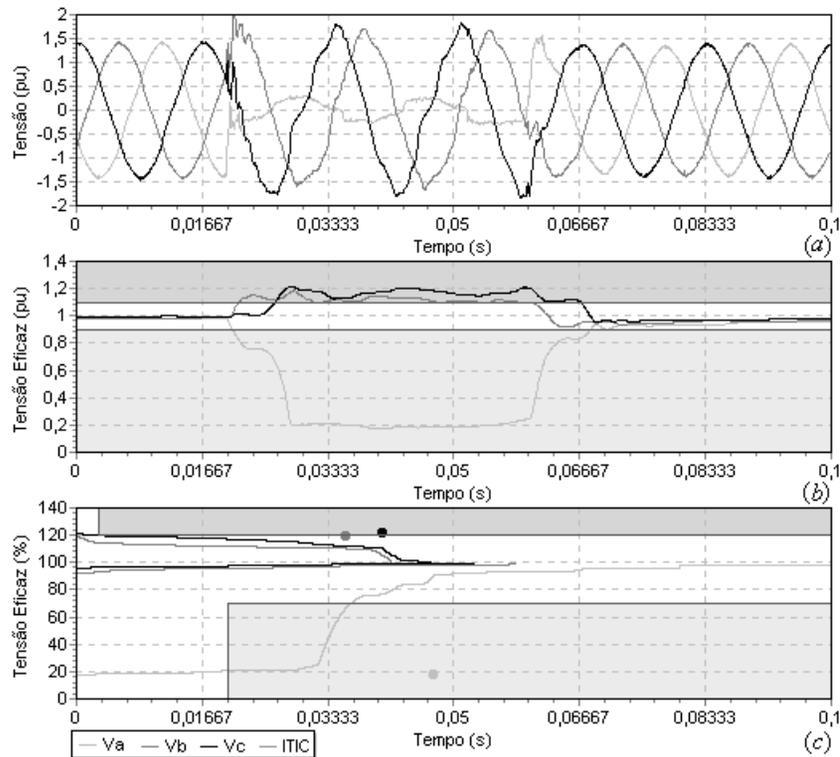


Figura i: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
(c) duração por níveis do evento ocorrido em
21/09/1994 às 07:17:44.

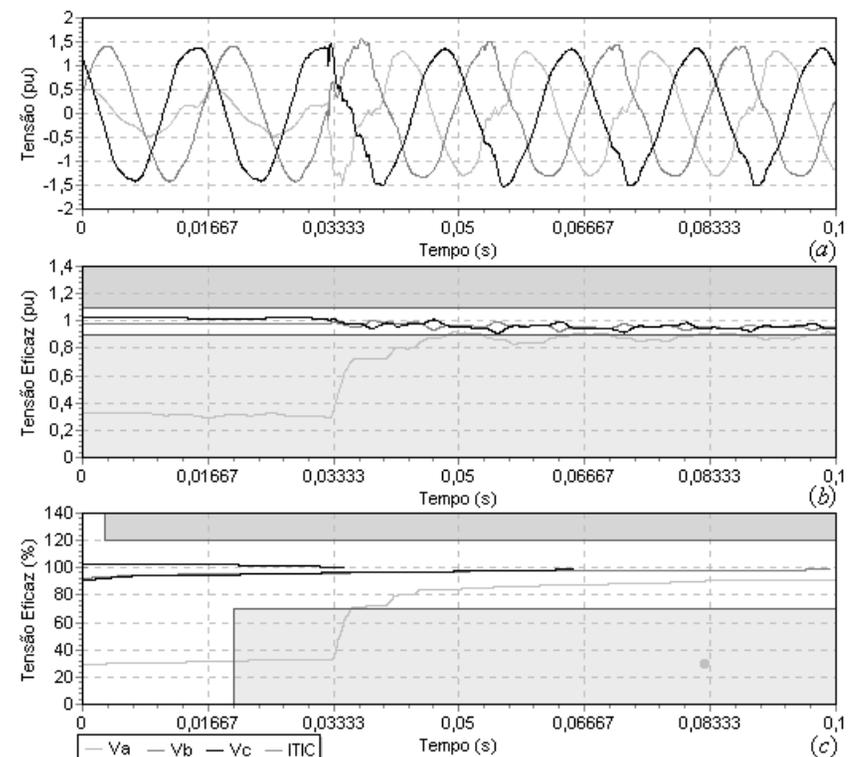


Figura ii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
(c) duração por níveis do evento ocorrido em
23/09/1994 às 15:40:14.

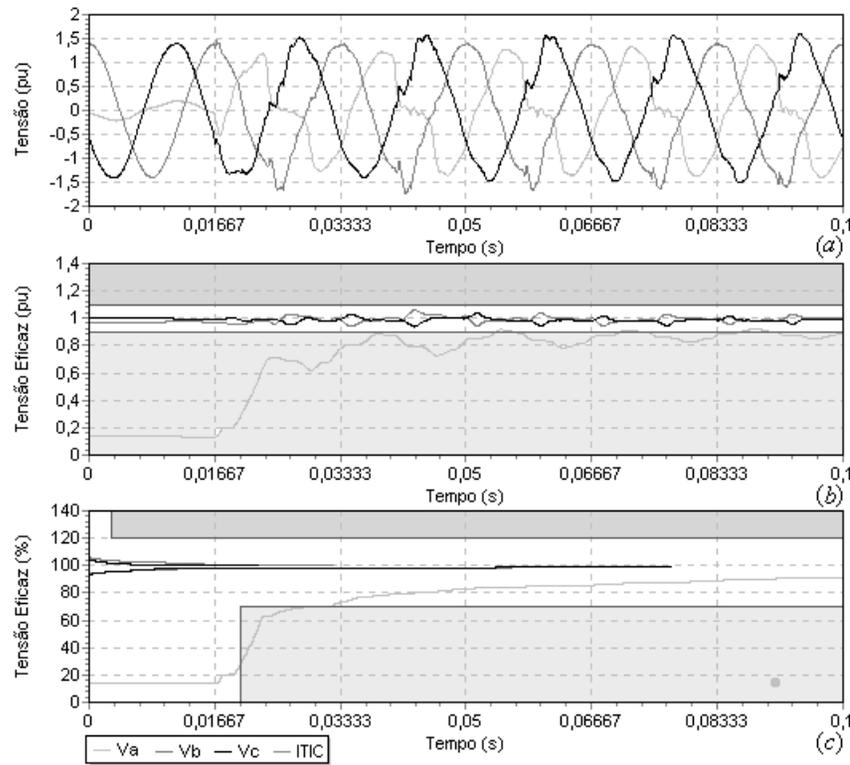


Figura iii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 30/10/1994 às 10:52:18.

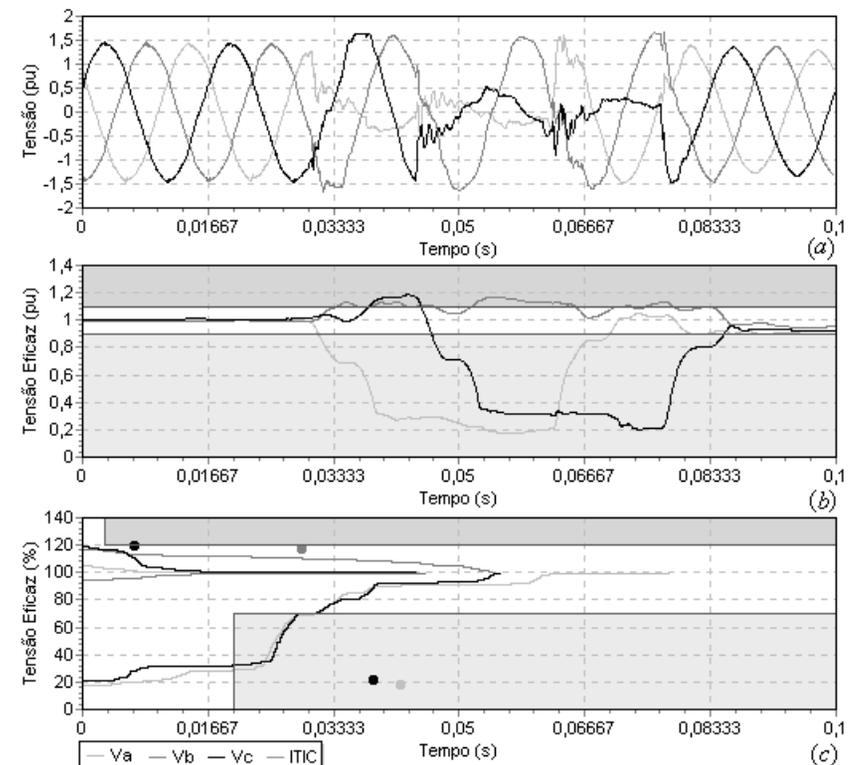


Figura iv: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 01/12/1994 às 10:14:39.

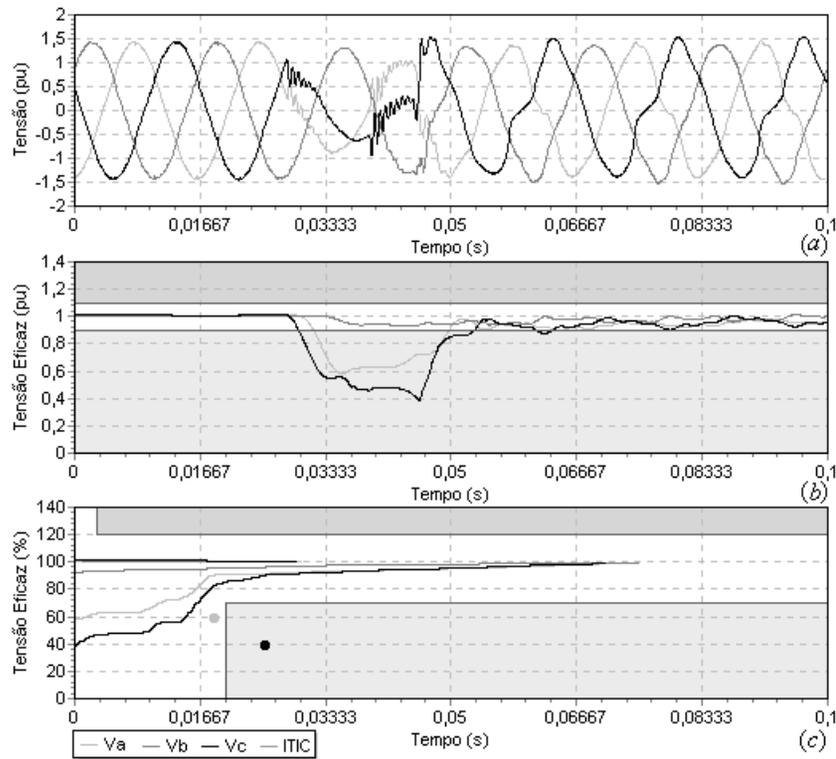


Figura v: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 06/12/1994 às 11:34:54.

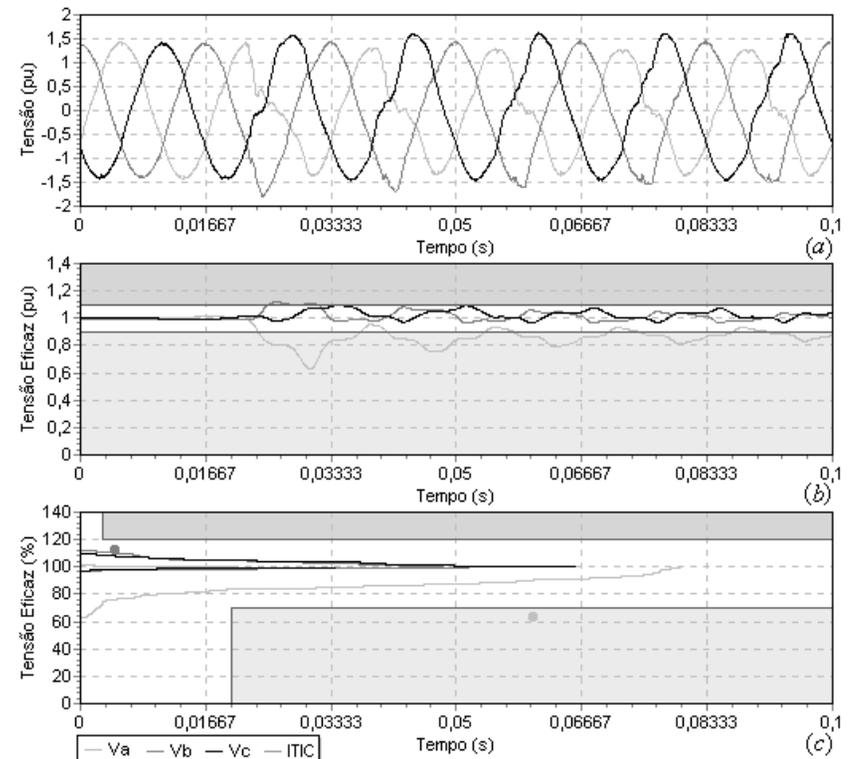


Figura vi: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 08/02/1995 às 19:01:16.

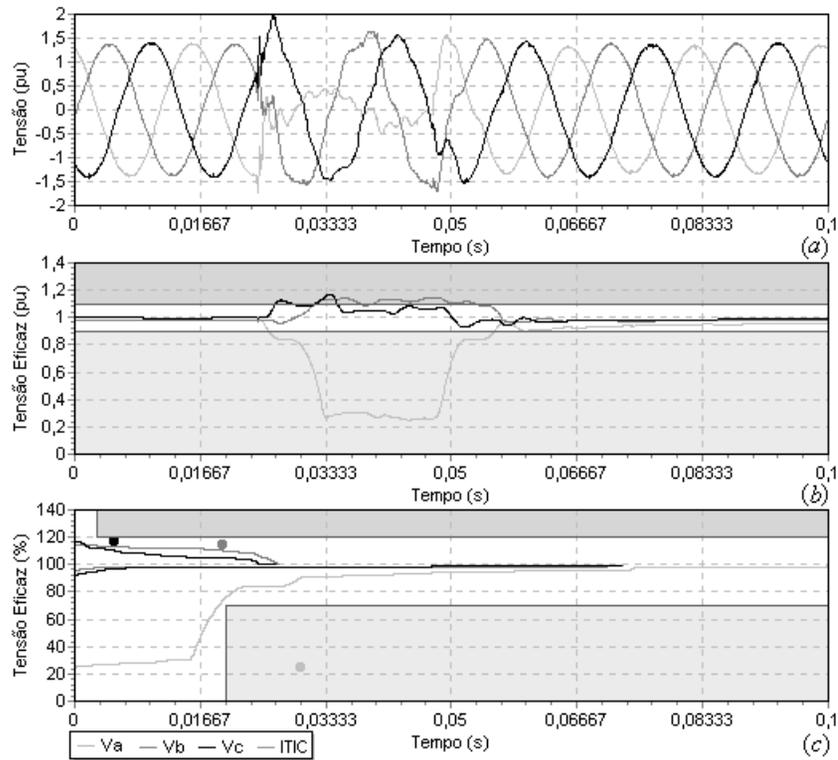


Figura vii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 01/05/1995 às 22:05:34.

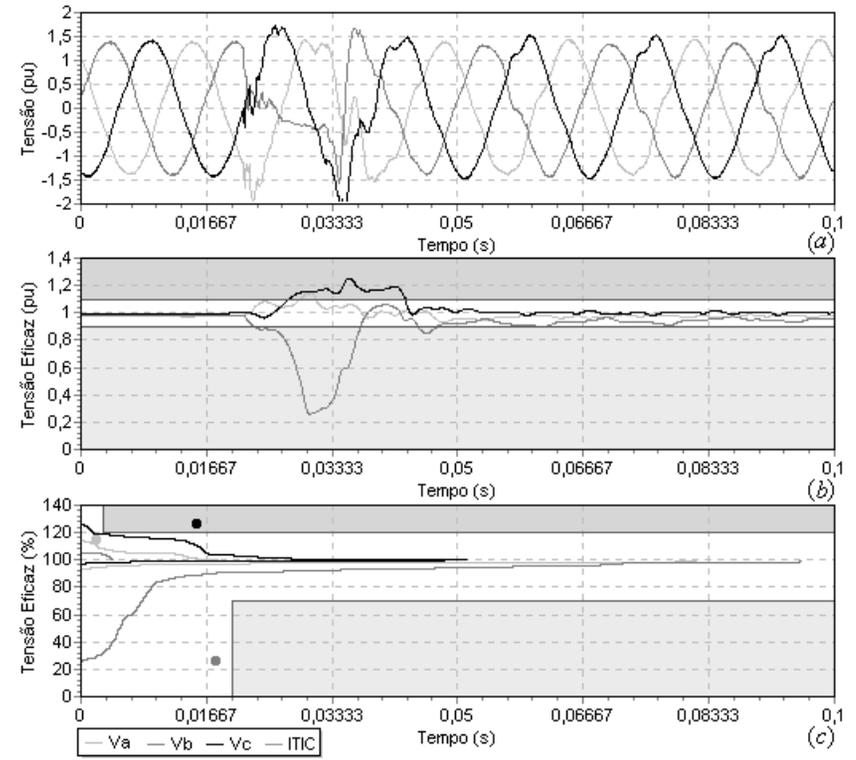


Figura viii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 03/05/1995 às 08:42:39.

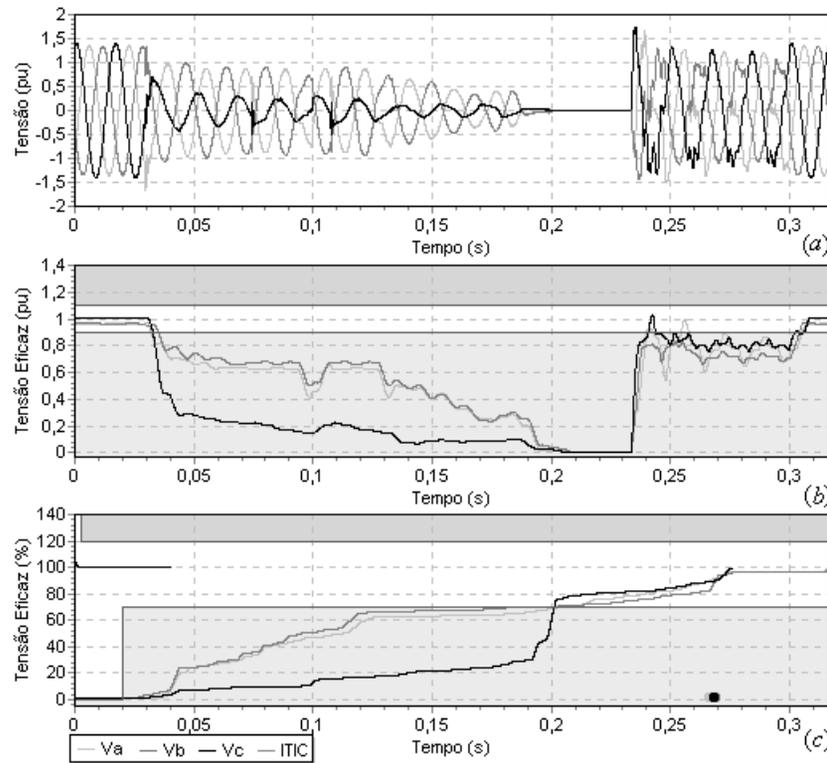


Figura ix: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 26/06/1995 às 21:07:17.

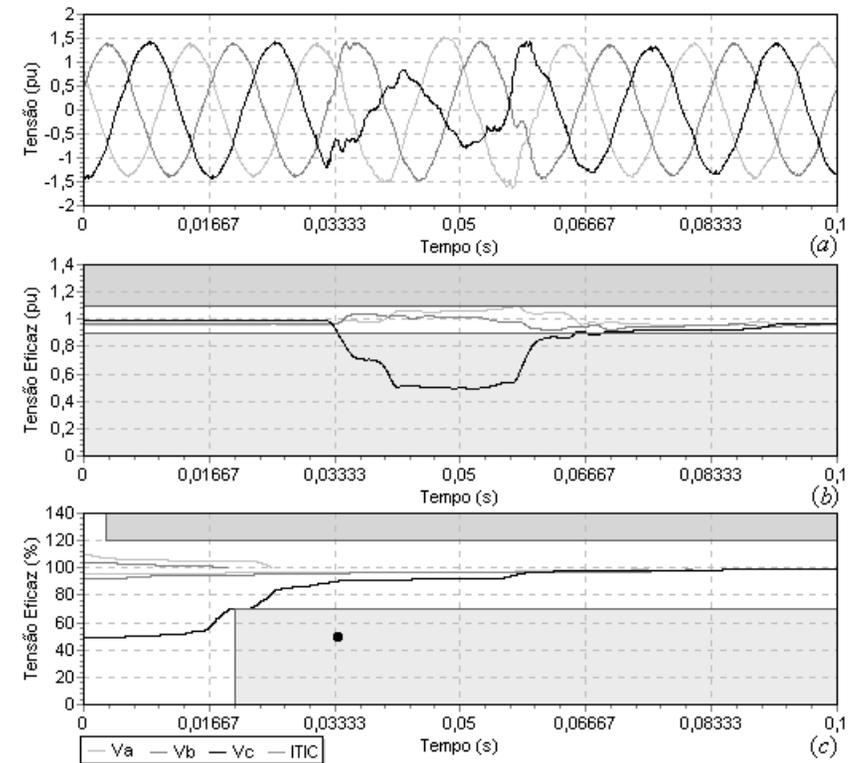


Figura x: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
 (c) duração por níveis do evento ocorrido em
 09/08/1995 às 12:27:37.

Apêndice B

Caracterização da propagação de uma falta simulada na seção 4.4.4

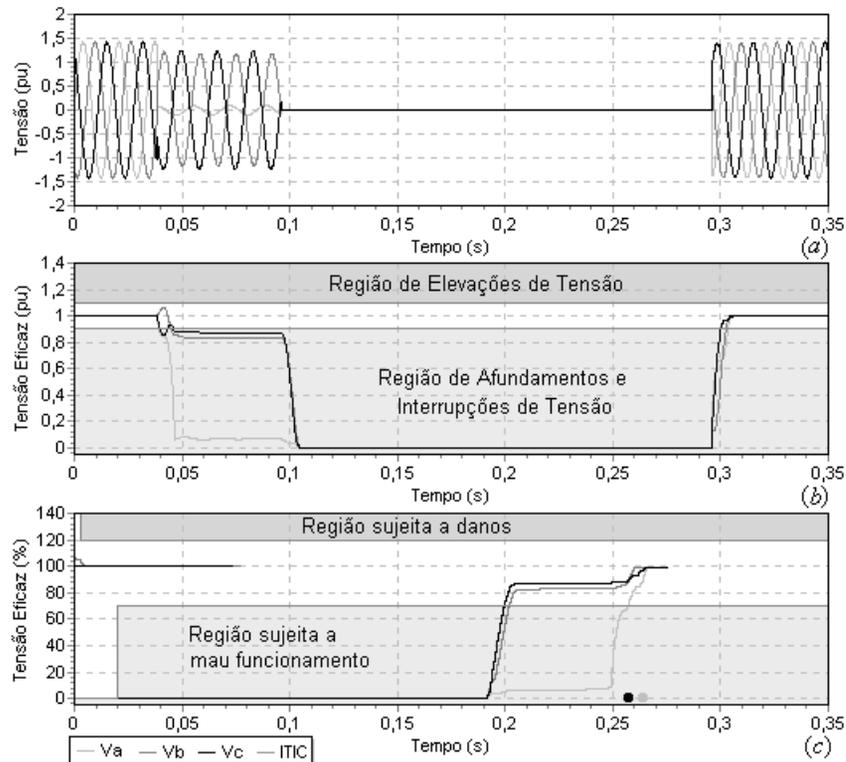


Figura i: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
(c) duração por níveis do evento registrado
na barra 1 do sistema.

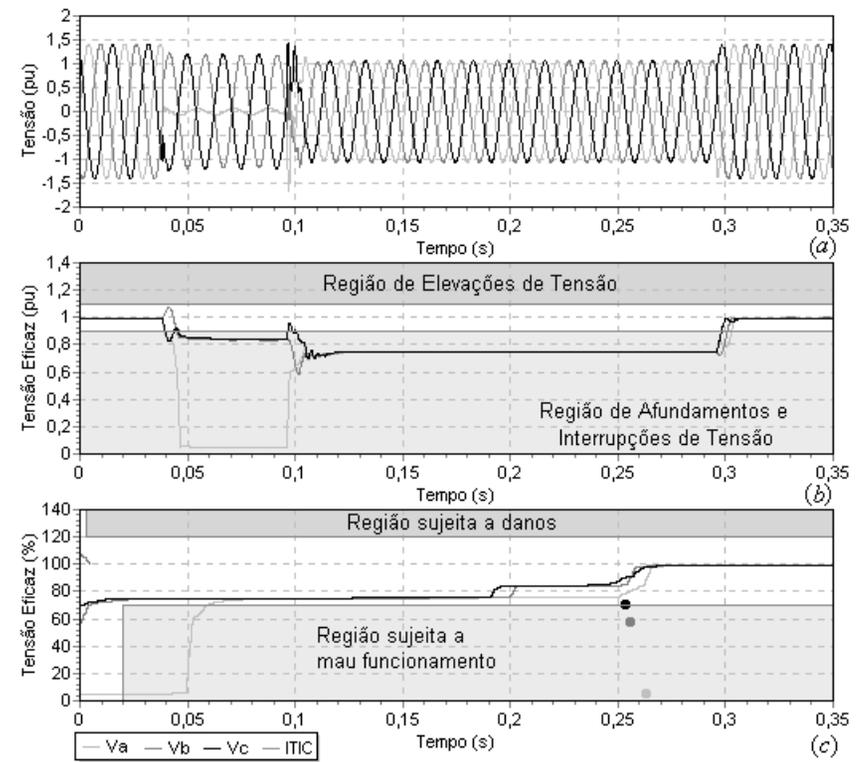


Figura ii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz;
(c) duração por níveis do evento registrado
na barra 2 do sistema.

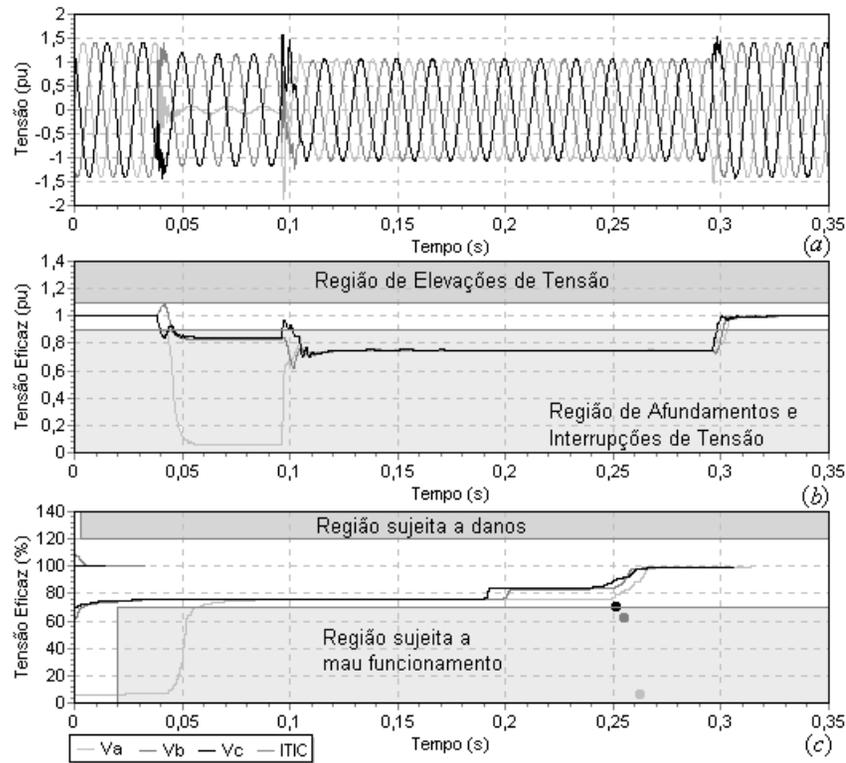


Figura iii: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 3 do sistema.

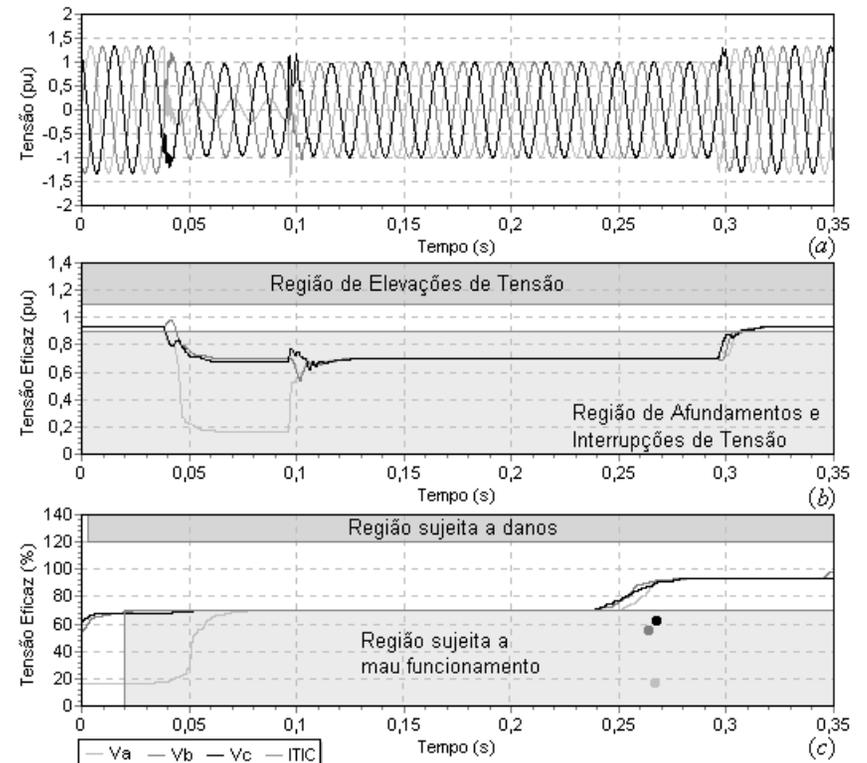


Figura iv: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 4 do sistema.

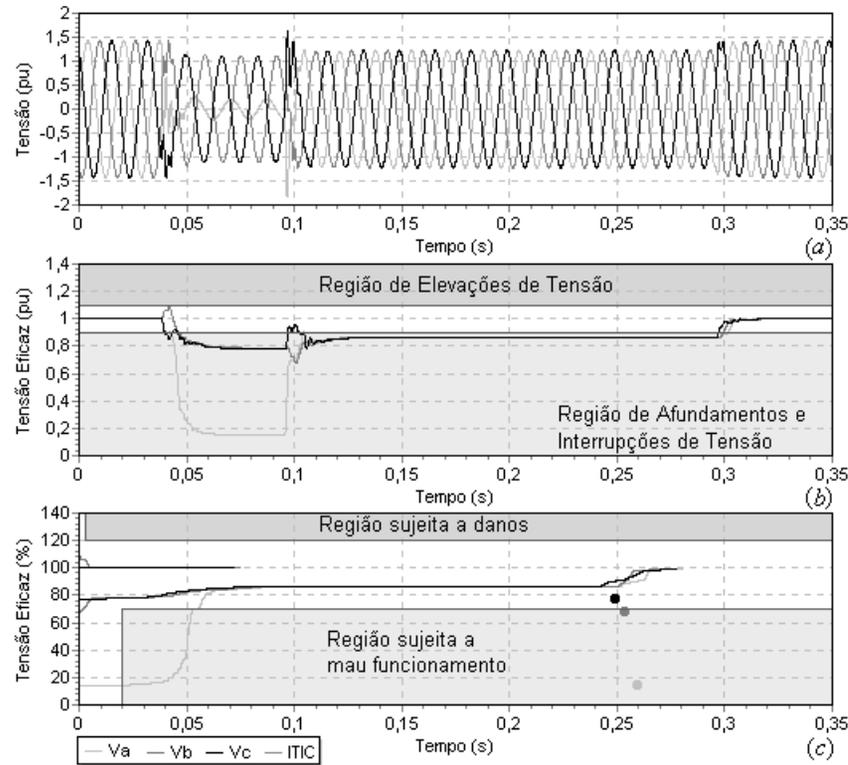


Figura v: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 5 do sistema.

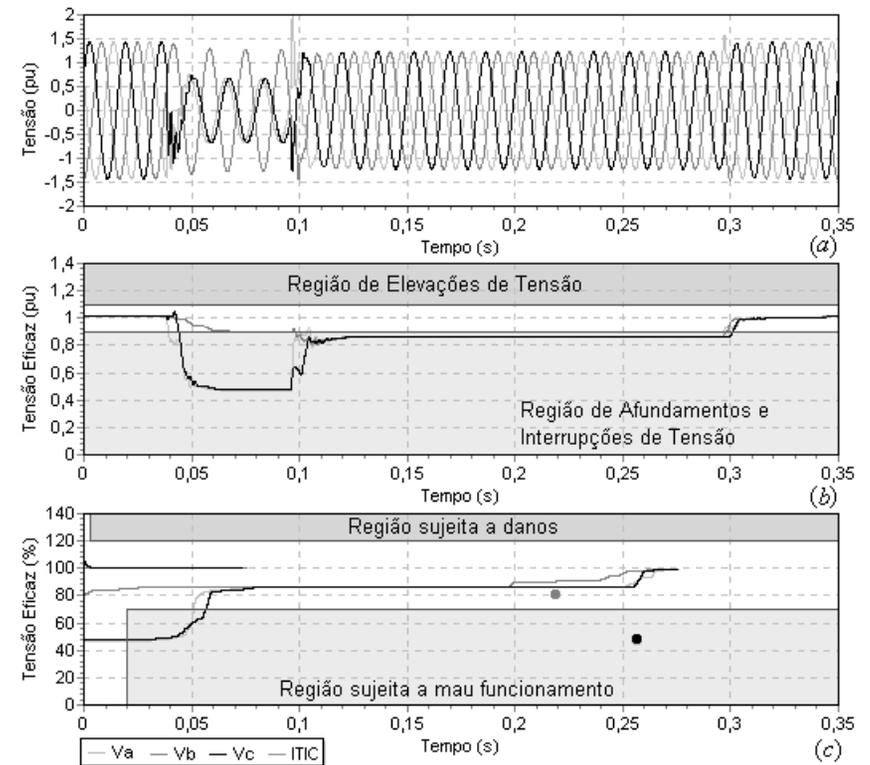


Figura vi: Curvas de: (a) forma de onda; (b) valor eficaz; (c) duração por níveis do evento registrado na barra 6 do sistema.