



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

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE VTCDs APLICADO A EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS ALIMENTADOS POR CONVERSOR CA-CC

ERNESTO KENJI LUNA
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. Fernando Pinhabel Marafão– Sorocaba/UNESP
Prof. Dr. José Antenor Pomílio– FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Nelson Kagan – Politécnica/USP
Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann – FEEC/UNICAMP

Campinas – SP – Brasil, 29 de julho de 2005

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

L971c Luna, Ernesto Kenji
Uma contribuição ao estudo de VTCDs aplicado a
equipamentos eletrônicos alimentados por conversor
CA-CC / Ernesto Kenji Luna. --Campinas, SP: [s.n.],
2005.

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

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Sistema de
energia elétrica. 3. Indicadores. 4. Energia elétrica -
Medição. I. Deckmann, Sigmar Maurer. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Aos meus Pais, à minha Irmã e às minhas Tias Neusa e Cecília

Resumo

Este trabalho visa contribuir para os estudos de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) buscando relacionar tais distúrbios com o real impacto que causam em uma importante família de cargas, são os equipamentos eletrônicos alimentados por conversores CA-CC. Esta correlação entre causa e efeito ainda é um dos pontos menos estudados no âmbito da Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Considerando o cenário nacional e internacional, inicialmente serão apresentadas as principais normas aplicáveis às VTCDs, caracterização de eventos e verificação de impacto sobre as cargas procurando sempre fazer uma análise crítica, mostrar suas convergências, particularidades e deficiências.

O estudo sobre a família de cargas escolhida terá como objetivo verificar os parâmetros mais relevantes frente às VTCDs, desenvolver técnicas para extração desse parâmetros, que possam ser utilizadas pelos fabricantes dos equipamentos, pelas concessionárias de energia elétrica e pelos consumidores finais desses equipamentos.

Finalmente, será apresentada uma metodologia para avaliação de impacto de VTCDs, baseado no comportamento das cargas estudadas, podendo ser aplicada a um equipamento isolado, como também a um processo industrial mais complexo.

Abstract

This dissertation presents a contribution to the study of voltage sags and swells and their real impact on an important group of loads constituted by electronic equipment supplied by AC-DC converters. The establishment of a relationship between cause and effect has still not being focused in the study of voltage sags and swells.

Initially, this work presents a critical analysis of the main International and Brazilian standards about characterization and impact estimation of voltage sags and swells, demonstrating the convergence, singularity and deficiency of each one.

Then, the study of the proposed load group aims to find and demonstrate the most important parameters related to voltage sags and swells, and to describe some techniques to obtain these parameters, which could be used by electronic manufacturers, utilities and equipment users.

Finally, a special methodology is proposed to evaluate the impact of voltage sags and swells, which is based on based on the behavior of the loads under consideration. The proposed methodology can be applied on single electronic equipment or also on a general system, such as industrial plants.

Agradecimentos

A toda minha família, meus pais, Sonia e Justo, a minha irmã, Aline e minhas tias, Satie e Cecília, que sempre me apoiaram em tudo que fiz e em todas as decisões importantes de minha vida.

Ao professor Sigmar com sua sabedoria e paciência pela orientação e todo auxílio que me foi prestado durante o desenvolvimento deste trabalho, e que hoje prezo grande respeito e admiração.

À minha querida Andréa que apareceu em minha vida e sempre foi muito carinhosa, me dando conselhos nos momentos mais difíceis.

Aos meus três grandes amigos aqui na Unicamp, Jim Natureza, Marcio M. Kubo e Maurício Barbosa, pelo incentivo na realização desse Mestrado, pelos momentos agradáveis nos churrascos e festas e também pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos e colegas do Departamento de Sistemas e Controle de Energia (DSCE) em especial do Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica (LCEE) e também do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE), pela boa receptividade e convivência agradável.

À Capes pelo apoio financeiro.

Finalmente à minha “cachorrinha” Meg que sempre está me esperando e sempre me recebe com muito carinho e alegria.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Siglas	xvii
Lista de Símbolos	xix
Lista de Figuras	xxiii
Lista de Tabelas	xxxi
1 Introdução.....	1
1.1 Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)	2
1.2 Motivações e Objetivos do Trabalho.....	4
1.3 Organização do Trabalho	5
2 Normas e Recomendações Aplicáveis a VTCD	7
2.1 Metodologia da Magnitude e Duração do Evento (M&D).....	9
2.1.1 Americana IEEE – Std. 1159 e Brasileira Submódulo 2.2 [32,33]	9
2.1.2 Européia EN 50160 e Sul-Africana NRS-048 [34,35]	11
2.2 Classificação dos Eventos de VTCD.....	12
2.2.1 Recomendação Brasileira do ONS - Submódulo 2.2 [32].....	12
2.2.2 IEEE Std 1159 – Norma Americana. [33]	14
2.2.3 EN 50160 – Norma Européia (CENELEC) [34]	16
2.2.4 NRS 048 – Norma Sul-Africana [35]	16
2.3 Limites de Tolerância de Equipamentos a VTCD.....	18
2.3.1 IEEE Std 446 (CBEMA/ITIC) [44].....	18

2.3.2 SEMI F47 [36]	19
2.4 Análise Crítica da Metodologia da Magnitude e sua Aplicação a VTCD em Geral	20
2.4.1 Eventos Distintos com mesma Magnitude e Duração	20
2.4.2 Dinâmica Lenta do Cálculo do Valor Eficaz – Janela de 1 Ciclo.....	22
2.4.3 Assimetria de ½ Onda - Cálculo do Valor Eficaz – Janela de ½ Ciclo	24
2.4.4 Cargas que Não Respondem pelo Valor Eficaz da Tensão.....	25
3 Modelagem de Cargas Eletrônicas Alimentadas por Fonte CC.....	27
3.1 Cargas Alimentadas através de Fonte CC.....	28
3.2 Características Básicas de Operação de Equipamentos Eletrônicos Alimentados por Fontes CC Monofásicas.	28
3.3 Tipos de Cargas Alimentadas pelo Conversor CA-CC com Filtro Capacitivo	29
3.4 Representação de Fonte CC Monofásica com Transformador na Entrada.	30
3.4.1 Curva de Carga do Capacitor para SED de Impedância Constante	31
3.4.2 Curva de Descarga do Capacitor para SED de Impedância Constante.....	36
3.5 Comportamento do Filtro Capacitivo com SED de Corrente Constante	39
3.5.1 Curva de Carga do Capacitor para SED de Corrente Constante.....	39
3.5.2 Curva de Descarga do Capacitor para SED de Corrente Constante	41
3.6 Comportamento do Filtro Capacitivo com SED de Potência Constante	44
3.6.1 Curva de Carga do Capacitor para SED de Potência Constante	44
3.6.2 Curva de Descarga do Capacitor para SED de Potência Constante.....	46
3.7 Comportamento do Filtro Capacitivo em Fontes Lineares e Fontes Chaveadas	49
3.7.1 Fonte Linear de Tensão (Regulador Simples).....	49
3.7.2 Fonte Chaveada.....	52
3.8 Conversor CA-CC Trifásico	55
3.8.1 Modelo do Conversor CA-CC Trifásico.....	56
3.8.2 Simulação de Fonte CC Chaveada com Conversor CA-CC Trifásico.....	59
4 Caracterização de Cargas Sensíveis a VTCDs.....	63
4.1 Cargas Sensíveis a Afundamentos de Tensão.....	64
4.1.1 Limites de Tolerância a Afundamento de Tensão	64
Região de Operação Normal	66
Região de Afundamento Tolerável	67
Região de Desligamento	68

Conclusão	69
4.1.2 Exemplo de Afundamento que Causaria Impacto em Carga Sensível	69
4.2 Cargas Sensíveis a Elevações de Tensão	70
4.2.1 Curva de Tolerância a Elevações de Tensão	70
Região de Operação Normal	72
Região de Elevações Toleráveis de Tensão.....	73
Região de Dano por Sobrecarga	74
Região de Ruptura de Isolação	75
4.2.2 Elevações de Tensão Causadora de Impacto em Cargas Sensíveis.....	76
4.3 Obtenção dos Parâmetros a partir das Curvas de Carga e Descarga do Filtro Capacitivo..	77
4.3.1 Obtenção dos Parâmetros de Forma Direta ou Invasiva.....	77
Obtenção da Característica de Descarga do Filtro Capacitivo	78
Obtenção da Característica de Carga do Filtro Capacitivo.....	80
4.3.2 Obtenção de Parâmetros de Forma Indireta ou Não Invasiva	84
Obtenção da Tensão Mínima de Alimentação ($V_{mín_{CA}}$)	84
Obtenção da Máxima Duração de Interrupção ($t_{máx_{CA}}$).....	84
Obtenção da Curva de Decaimento vista pelo lado CA	85
4.4 Indicador de Impacto de VTCD em Cargas Sensíveis (Resposta do Filtro Capacitivo). 87	
4.4.1 Indicador de Impacto de VTCD para Micro-Sistemas	87
4.4.2 Indicadores de Impacto para Macro-Sistemas.....	90
4.5 Comparação entre Curvas de Tolerância e Curvas Normativas.....	92
4.6 Validação do Modelo Sob Nova Condição de Operação	96
5 Ensaio em Cargas Eletrônicas Alimentadas Através de Fontes CC.....	99
5.1 Rádio Relógio – Lenox Sound.	102
5.1.1 Extração de Parâmetros e Modelos do Rádio Relógio.	103
Parametrização de Forma Direta ou Invasiva.....	103
Construção do Modelo para o Rádio Relógio – Forma Direta.	105
Parametrização de Forma Indireta ou Não Invasiva.....	107
Construção do Modelo do Rádio Relógio – Forma Indireta.	109
5.1.2 Validação dos Modelos do Rádio Relógio (Forma Direta)	111
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{máx}$, Não Causa Impacto.....	111
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{mín}$, Não Causa Impacto.....	113

Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{\max}$ e $V_{\min}$, Não Causa Impacto.	114
Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Rádio Relógio.	116
Resposta a Elevação de Tensão.	118
Resposta a Surto de Tensão.	119
5.1.3 Validação dos Modelos do Rádio Relógio (Forma Indireta).	121
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{\max_{CA}}$, Não Causa Impacto.	121
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$, Não Causa Impacto.	122
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{\max_{CA}}$ e $V_{\min_{CA}}$, Não Causa Impacto.	123
Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Rádio Relógio (Forma Indireta).	124
5.1.4 Validação para Novas Condições de Operação (Rádio Relógio).	125
5.2 Televisor – Philips	128
5.2.1 Extração de Parâmetros e Modelos para o Televisor	129
Parametrização de Forma Direta ou Invasiva	129
Construção do Modelo do Televisor – Forma Direta	131
Parametrização de Forma Indireta ou Não Invasiva	132
Construção do Modelo do Televisor – Forma Indireta	134
5.2.2 Validação dos Modelos do Televisor (Forma Direta)	135
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{\max}$, Não Causa Impacto.	135
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$, Não Causa Impacto.	137
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$ e $t_{\max}$, Não Causa Impacto.	139
Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Televisor.	141
5.2.3 Validação dos Modelos do Televisor (Forma Indireta)	143
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{\max_{CA}}$, Não Causa Impacto.	143
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$, Não Causa Impacto.	144
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$, Não Causa Impacto.	145
Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Televisor.	146
5.2.4 Validação para Nova Condição de Operação (Televisor)	147
5.3 Microcomputador – Pentium 200MHz	149
5.3.1 Extração de Parâmetros e Modelos do Microcomputador	150
Parametrização de Forma Direta ou Invasiva	150
Construção do Modelo do Microcomputador – Forma Direta	152

Parametrização de Forma Indireta ou Não Invasiva.....	153
Construção do Modelo do Microcomputador – Forma Indireta.....	154
5.3.2 Validação dos Modelos do Microcomputador (Forma Direta)	156
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$, Não Causa Impacto.....	156
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{m}n}$, Não Causa Impacto.....	158
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{m}n}$ e $t_{m\acute{a}x}$, Não Causa Impacto.....	160
Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Microcomputador.	162
Resposta a Elevação de Tensão.	164
Resposta a Surto de Tensão.	165
5.3.3 Validação dos Modelos do Microcomputador (Forma Indireta)	166
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{m\acute{a}x_{CA}}$, Não Causa Impacto.	166
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{m}n_{CA}}$, Não Causa Impacto.	167
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{m}n_{CA}}$ e $t_{m\acute{a}x_{CA}}$, Não Causa Impacto.	168
Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Microcomputador.	169
5.3.4 Validação para Nova Condição de Operação (Microcomputador)	170
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	173
6.1 Conclusões Finais.....	173
6.2 Principais Contribuições deste Trabalho	175
6.3 Trabalhos Futuros.....	175
Referências Bibliográficas	177
Apêndices	181
A1 Curva de Sensibilidade CBEMA [1,2,12,13]	181
A2 Caracterização de VTCD.....	182
A2.1 Perda de Tensão (PV) [12,13]:	182
A2.2 Perda de Energia (PE) [12,13]:.....	182
A2.3 Método de Bollen [1,13,27]:	182
A2.4 Método de EPRI/Electrotek [12,13,29]:	184
A3 Ponteira Diferencial do Osciloscópio.....	185
A4 Trabalhos Publicados	187

Lista de Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CBEMA	“Computer Business Equipment Manufacturers Association”
CC	Corrente Contínua
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CENELEC	“European Committee for Electrotechnical Standardization”
CIGRÉ	“International Council on Large Electric Systems”
CPD	Centro de Processamento de Dados
IEEE	“Institute of Electrical and Electronics Engineers”
EUA	Estados Unidos da América
ITIC	“Information Technology Industry Council”
M&D	Metodologia da “Magnitude e Duração” do Evento
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PC	“Personal Computer” - Microcomputador
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SED	Sistema Eletrônico Dedicado
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials Institute
TI	Tecnologia da Informação
UPS	“Uninterruptible Power Supply”
VTCD(s)	Variação(ões) de Tensão de Curta Duração

Lista de Símbolos

a	Relação de Transformação
C	Capacitância do Filtro CC
$e(t)$	Tensão de entrada ou excitação
$E(t)$	Energia variável
E_o	Energia potencial elétrica inicial no filtro CC
$i(t)$	Corrente no circuito
$i_C(t)$	Corrente do filtro CC
I_C	Valor da corrente no bipolo SED de corrente constante
$i_{Pc}(t)$	Corrente no bipolo SED de potência constante
$i_R(t)$	Corrente no resistor ou bipolo SED de impedância constante
$i_T(t)$	Corrente total
Leq	Indutância equivalente do transformador
Leq_2	Indutância equivalente do transformador referida ao secundário
L_1	Indutância do enrolamento primário
L_2	Indutância do enrolamento secundário
N_1	Número de espiras do enrolamento primário
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário
N	Número de amostras de um período da fundamental amostrada
P_C	Valor para o bipolo SED de potência constante
$q(t)$	Cargas elétricas variáveis
Q_o	Carga elétrica inicial no filtro CC
R	Resistencia de Carga ou Valor da resistência para bipolo SED de impedância constante
R_1	Resistência do enrolamento primário
R_2	Resistência do enrolamento secundário
Req_1	Resistência equivalente do transformador referida ao primário

r_D	Resistência equivalente do diodo (estágio de retificação)
Req_2	Resistência equivalente do transformador referida ao secundário
Req	Resistência equivalente do circuito
t_a	Início do afundamento de tensão
ta	Taxa de amostragem
t_e	Início da elevação de tensão
$t_{63\%}$	Tempo correspondente a uma constante de tempo
$tmáx$	Máxima duração de um afundamento de tensão, visto pelo lado CC
$tmáx_{CA}$	Máxima duração de um afundamento de tensão, visto pelo lado CA
tf	Instante final de uma VTCD
ti	Instante final de uma VTCD
T	Período de um sinal amostrado
$v_C(t)$	Tensão no filtro CC
$v_R(t)$	Tensão no resistor ou bipolo SED de impedância constante
$v_{RET}(t)$	Tensão após o estágio de retificação
$v_s(t)$	Tensão após o transformador de entrada
V_I	Tensão nominal do primário do transformador
V_2	Tensão nominal do secundário do transformador
V_p	Tensão de pico
$V_{mín}$	Mínimo valor de tensão para um afundamento de tensão, visto pelo lado CC
$V_{mín_{CA}}$	Mínimo valor de tensão para um afundamento de tensão, visto pelo lado CA
v_D	Queda de tensão do diodo do estágio de retificação
$V_{Pn}(t)$	Tensão envoltória positiva
$V_{nN}(t)$	Tensão envoltória negativa
$V'_{PN}(t)$	Tensão após estágio de retificação trifásico (ideal)
$V_{PN}(t)$	Tensão após estágio de retificação trifásico considerando os parâmetros do estágio de retificação
V_{res}	Tensão eficaz residual de uma VTCD
V_O	Tensão inicial do filtro CC
V_n	Valor nominal da tensão
$V_{63\%}$	Tensão correspondente a uma constante de tempo
X_I	Reatância de dispersão do primário
X_2	Reatância de dispersão do secundário

Xeq_1	Reatância equivalente de dispersão do transformador referida ao primário
Xeq_2	Reatância equivalente de dispersão do transformador referida ao secundário
Xeq	Reatância equivalente de dispersão do transformador referida ao secundário
Z_1	Impedância do primário do transformador
Z_2	Impedância do secundário do transformador
Ze_{q1}	Impedância equivalente do transformador referida ao primário
Ze_{q2}	Impedância equivalente do transformador referida ao secundário
Ze_{q}	Impedância equivalente do circuito
Δt	Duração de uma VTCD em segundos ou ciclos da fundamental
V_{mag}	Magnitude de uma VTCD em %, pu ou V.

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 – Frequência de Ocorrência de Distúrbios nos E.U.A [14]	3
--	---

Capítulo 2

Figura 2.1 - Caracterização de um Afundamentos de Tensão Normas Brasileira e Americana. ..	10
Figura 2.2 - Caracterização de um Afundamentos de Tensão Normas Européia e Sul-Africana.	11
Figura 2.3 - Gráfico de Classificação de Afundamentos de Tensão Segundo Norma Sul-Africana[35].	17
Figura 2.4 – Limites de Tolerância ITIC [37].	19
Figura 2.5 - Limites de Tolerância SEMI F47 [36].	20
Figura 2.6 - Eventos de Afundamento de Tensão com mesma Magnitude e Duração	21
Figura 2.7 - Eventos 01 e 02 Distintos com mesma Representação de M&D.	21
Figura 2.8 - Resposta do Valor Eficaz para Janela Móvel de 1 Ciclo.	22
Figura 2.9 - Janela Móvel de 1 Ciclo e Interrupção de 0,5 Ciclo.	23
Figura 2.10 - Resposta do Valor Eficaz para Janela Móvel de 0,5 Ciclo.	24
Figura 2.11 - Janela de 0,5 Ciclo e Assimetria de Meia Onda (Fundamental + 2ª harmônica). ...	24
Figura 2.12 – Cargas que Não Respondem ao Valor Eficaz e Influência de Harmônicos.	26

Capítulo 3

Figura 3.1 – Fonte CC Alimentando Carga Sensível.	28
Figura 3.2 — Estrutura Típica do Fonte CC Detalhada.	29
Figura 3.3 - Tipos de Cargas Alimentadas pelo Conjunto Conversor CA-CC com Filtro Capacitivo.	29
Figura 3.4 – Fonte CC Monofásica Alimentando SED tipo Impedância Constante.	30

Figura 3.5 - Modelo da Fonte CC Alimentando SED tipo Impedância Constante.....	30
Figura 3.6 - Modelo da Fonte CC Alimentando um SED tipo Impedância Constante.	31
Figura 3.7 - Modelo para Carga do Filtro Capacitivo com SED de Impedância Constante.....	31
Figura 3.8 - Resposta de Carga do Filtro Capacitivo Alimentando SED tipo Impedância Constante	35
Figura 3.9 - Modelo para Descarga do Filtro Capacitivo para SED de Impedância Constante. ...	36
Figura 3.10 - Resposta de Descarga do Filtro Capacitivo para SED tipo Impedância Constante. 37	
Figura 3.11 - Efeito de Afundamento de Tensão sobre SED de Impedância Constante.	37
Figura 3.12 - Modelo de Fonte CC Alimentando SED tipo Corrente Constante.	39
Figura 3.13 - Modelo para Carga do Filtro Capacitivo com SED tipo Corrente Constante.	39
Figura 3.14 - Resposta de Carga do Filtro Capacitivo alimentando SED tipo Corrente Constante.	41
Figura 3.15 - Modelo para Descarga do Filtro Capacitivo para SED de Corrente Constante.	41
Figura 3.16 - Resposta de Descarga do Filtro Capacitivo para SED tipo Corrente Constante.....	42
Figura 3.17 - Resposta de Fonte CC Alimentando SED tipo Corrente Constante.	43
Figura 3.18 - Modelo de Fonte CC alimentando SED tipo Potência Constante.....	44
Figura 3.19 - Modelo para Carga do Filtro Capacitivo com SED de Potência Constante.....	44
Figura 3.20 - Resposta de Carga do Filtro Capacitivo alimentando SED tipo Potência Constante.	46
Figura 3.21 - Modelo para Descarga do Filtro Capacitivo para SED de Potência Constante.	46
Figura 3.22 - Resposta de Descarga do Filtro Capacitivo Alimentando SED tipo Potência Constante.	48
Figura 3.23 - Resposta para SED de Potência Constante.	48
Figura 3.24 - Modelo para Fonte CC Linear.	49
Figura 3.25 - Resposta Filtro Capacitivo para Fonte Linear.....	50
Figura 3.26 - Modelo para Fontes CC Chaveadas.	52
Figura 3.27 - Resposta para uma Fonte Chaveada.	52
Figura 3.28 – Ponte Retificadora Trifásica a Diodos. [4].....	55
Figura 3.29 -(a) Tensões Aplicadas nas Entradas $e_a(t)$, $e_b(t)$ e $e_c(t)$,.....	56
Figura 3.30 - Modelo para o Estágio de Retificação Trifásica.	57
Figura 3.31 - Algoritmo para o Modelo de Retificador Trifásico Ideal.	57
Figura 3.32 - (a) Algoritmo para Obtenção da Envoltória Positiva $V_{Pn}(t)$	58
Figura 3.33 - Modelo para Fonte CC Chaveada Trifásica.	59
Figura 3.34 - Resposta da Fonte-CC Trifásica Chaveada.....	61

Capítulo 4

Figura 4.1 - Limites de Tolerância ou Sensibilidade a Afundamentos de Tensão.....	65
Figura 4.2 (a) e (b) – Evento na Região de Operação Normal.....	66
Figura 4.3 (a) e (b) - Evento na Região de Afundamento Tolerável.....	67
Figura 4.4 (a) e (b) - Evento que adentra a Região de Desligamento.	68
Figura 4.5 - Evento de Afundamento de Tensão que causa Desligamento.....	69
Figura 4.6 - Curva de Tolerância a Elevações de Tensão.	71
Figura 4.7 (a) e (b) - Evento na Região de Operação Normal.....	72
Figura 4.8 (a) e (b) - Evento na Região de Elevações Toleráveis.	73
Figura 4.9 (a) e (b) - Evento na Região de Dano.	74
Figura 4.10 (a) e (b)- Evento na Região de Ruptura de Dielétrico.	75
Figura 4.11 - Evento de Elevações de Tensão e a Resposta observada pela Carga Sensível.....	76
Figura 4.12 – Esquema usado para obtenção das Curvas de Carga e Descarga do Filtro Capacitivo.	78
Figura 4.13 - Resposta do Filtro Capacitivo a uma Interrupção Prolongada.	78
Figura 4.14 - Resposta de Carga a um Degrau de Tensão.	80
Figura 4.15 - Esquema para Obtenção dos Parâmetros do Transformador de Entrada da Fonte CC.	82
Figura 4.16 - Eventos Usados para Determinação da Curva de Decaimento:	86
Figura 4.17 - Comparação entre os Parâmetros de M&D e os Limites de Tolerância.....	88
Figura 4.18 – Macro-sistema com Múltiplas Cargas Sensíveis.	90
Figura 4.19 – Limite de Tolerância de Macro-sistema Composto de 3 Cargas Sensíveis a VTCDs.	91
Figura 4.20 - CBEMA/ITIC – Limites de Equipamento de Tecnologia de Informação e Comparação com Computador Testado – Capítulo 5.	93
Figura 4.21 – Sugestão de Limites de Tolerância à Afundamentos de Tensão para Concessionárias e Fabricantes.	95
Figura 4.22 – Nova Condição do Ponto de Desligamento para Validação dos Modelos.....	97

Capítulo 5

Figura 5.1 - Bancada para Ensaio dos Equipamentos.....	101
Figura 5.2 - Rádio Relógio Lenox Sound.....	102
Figura 5.3 – $v_c(t)$ Devido a uma Interrupção - Extração dos Limites de Tolerância do Rádio Relógio.	104
Figura 5.4 - Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão do Rádio Relógio (Forma Direta).	105
Figura 5.5 - Algoritmo que representa um Retificador Monofásico (Rádio Relógio).....	105
Figura 5.6 – Característica do Rádio Relógio Ensaiado:	108
Figura 5.7 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Interrupção Tangenciado $t_{máx}$	112
Figura 5.8 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{mín}$	113
Figura 5.9 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando os Limites $V_{mín}$ e $t_{máx}$	115
Figura 5.10 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.	116
Figura 5.11 - Ampliação para Visualização do Ponto de Impacto do Afundamento de Tensão.	117
Figura 5.12 - Resposta do Rádio Relógio a uma Elevação de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Rádio Relógio – Evento de Elevação de Tensão..	118
Figura 5.13 - Resposta do Rádio Relógio a um Surto de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Rádio Relógio – Surto de Tensão.	119
Figura 5.14 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D - Interrupção Tangenciando $t_{máx_{CA}}$	121
Figura 5.15 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{mín_{CA}}$	122
Figura 5.16 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{mín_{CA}}$ e $t_{máx_{CA}}$	123
Figura 5.17 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.....	124

Figura 5.18 - Condições Originais e Novas Condições para o Ponto de Desligamento no Rádio Relógio.....	126
Figura 5.19 - $v_c(t)$ Obtido Depois da Troca do Capacitor Original de 220mF pelo Adotado 5,0mF.	127
Figura 5.20 - Televisor Marca Philips.....	128
Figura 5.21 - Degrau de Tensão e Resposta do Filtro Capacitivo do Televisor, para extração dos parâmetros da Resposta de Carga do Filtro Capacitivo - Canal 2 (Ch2), 10mV/div - 500mV/div.	129
Figura 5.22 - $v_c(t)$ Devido a uma Interrupção - Extração dos Limites de Tolerância do Televisor, Canal 2 (Ch2), 200mV/div $\rightarrow$ 100V/div.....	130
Figura 5.23 - Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão do Televisor (Forma Direta) .	131
Figura 5.24 – Característica do Televisor Ensaiado:.....	133
Figura 5.25 -Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Interrupção Tangenciado $t_{m\acute{a}x}$	135
Figura 5.26 - Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{i}n}$..	137
Figura 5.27 - Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando os Limites $V_{m\acute{i}n}$ e $t_{m\acute{a}x}$	139
Figura 5.28 - Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.....	141
Figura 5.29 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D - Interrupção Tangenciando $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	143
Figura 5.30 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$	144
Figura 5.31 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$ e $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	145
Figura 5.32 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.....	146
Figura 5.33 - Condições Originais e Nova Condição Desejada para o Televisor	147
Figura 5.34 - $v_c(t)$ Obtido Depois da Troca do Capacitor (C_{AD}) no Televisor.	148
Figura 5.35 – Microcomputador – Pentium MMX 200MHz	149
Figura 5.36 - Degrau de Tensão e Resposta do Filtro Capacitivo do Microcomputador, para extração dos parâmetros da Resposta de Carga do Filtro Capacitivo - Canal 2 (Ch2), 10mV/div $\rightarrow$ 500mV/div.....	150

Figura 5.37 - $v_c(t)$ Devido a uma Interrupção - Extração dos Limites de Tolerância do Microcomputador	151
Figura 5.38 - Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão do Microcomputador (Forma Direta).....	152
Figura 5.39 – Características do Microcomputador Ensaiado:.....	154
Figura 5.40 -Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Interrupção Tangenciado $t_{m\acute{a}x}$	156
Figura 5.41 - Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{n}}$	158
Figura 5.42 - Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando os Limites $V_{m\acute{n}}$ e $t_{m\acute{a}x}$	160
Figura 5.43 - Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Desligamento.....	162
Figura 5.44 - Resposta do Microcomputador a uma Elevação de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Microcomputador – Evento de Elevação de Tensão	164
Figura 5.45 - Resposta do Microcomputador a um Surto de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Microcomputador – Surto de Tensão.....	165
Figura 5.46 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D - Interrupção Tangenciando $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	166
Figura 5.47 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{n}_{CA}}$	167
Figura 5.48 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{n}_{CA}}$ e $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	168
Figura 5.49 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Desligamento.	169
Figura 5.50 - Condições Originais e Nova Condição Desejada para o Microcomputador.....	170
Figura 5.51 - $v_c(t)$ Obtido Depois da Troca do Capacitor (C_{AD}) no Microcomputador.	171

Apêndices

Figura A.1 – Curva CBEMA substituída pela atual ITIC (revisão de 2000)	181
Figura A.2 – Diagrama Fasorial dos Quatro Tipos de Faltas e Afundamentos de Tensão	183
Figura A.3 – Caracterização de um Afundamento de Tensão Não Retangular.	184
Figura A. 4 - (a) Ponteira Diferencial Utilizada nos Ensaios de Laboratório	185

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Classificação das VTCD segundo Procedimentos de Rede do ONS [32].....	13
Tabela 2.2 - Classificação das VTCD segundo IEEE - Std 1159 [1,33].	14
Tabela 2.3 - Classificação de Transitórios Impulsivos segundo IEEE - Std 1159 [33].	15
Tabela 2.4 - Classificação de Transitórios Oscilatórios segundo IEEE - Std 1159 [33].....	15
Tabela 2.5 - Classificação das VTCDs segundo CENELEC - EN 50160 [1,34]	16
Tabela 2.6 - Níveis de Ocorrência de Afundamentos de Tensão segundo Norma Sul-Africana [35].	17

Capítulo 5

Tabela 5.1 - Parâmetros Obtidos para o Rádio Relógio Lenox Sound.....	103
Tabela 5.2 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Direta)	104
Tabela 5.3 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Indireta)	107
Tabela 5.4 - Considerações para Resposta de Carga do Filtro Capacitivo (Forma Indireta)	109
Tabela 5.5 - Comparação entre os Métodos da Forma Direta com a Forma Indireta	125
Tabela 5.6 - Parâmetros Obtidos do Microcomputador por Inspeção e pela Figura 5.21	129
Tabela 5.7 - Parâmetros Obtidos para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão	130
Tabela 5.8 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Indireta)	132
Tabela 5.9 - Considerações para Resposta de Carga do Filtro Capacitivo (Forma Indireta)	134
Tabela 5.10 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Interrupção Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$	136
Tabela 5.11 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afundamento Tangenciando $V_{m\acute{i}n}$	138
Tabela 5.12 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Tangenciando $V_{m\acute{i}n}$ e $t_{m\acute{a}x}$	140

Tabela 5.13 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto	142
Tabela 5.14 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	143
Tabela 5.15 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$	144
Tabela 5.16 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afund. Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$ e $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	145
Tabela 5.17 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto	146
Tabela 5.18 - Parâmetros Obtidos do Microcomputador por Inspeção e pela Figura 5.21	150
Tabela 5.19 - Parâmetros Obtidos para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão... 151	
Tabela 5.20 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Indireta).....	153
Tabela 5.21 - Considerações para Resposta de Carga do Filtro Capacitivo (Forma Indireta).....	155
Tabela 5.22 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Interrupção Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$	157
Tabela 5.23 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afundamento Tangenciando $V_{m\acute{i}n}$	159
Tabela 5.24 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Tangenciando $V_{m\acute{i}n}$ e $t_{m\acute{a}x}$	161
Tabela 5.25 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto	163
Tabela 5.26 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Elevação de Tensão	164
Tabela 5.27 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Surto de Tensão	165
Tabela 5.28 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	166
Tabela 5.29 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$	167
Tabela 5.30 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afund. Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$ e $t_{m\acute{a}x_{CA}}$	168
Tabela 5.31 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto	169

Apêndices

Tabela A.1 – Tipo de Faltas, Tipos de Afundamentos e Conexão da Carga.....	182
Tabela A.2 – Quadro Tipos de Afundamentos e Equações	183
Tabela A. 3 - Transformação do Afundamento para o Lado da Baixa Tensão	184

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas elétricos de potências existem para garantir o transporte de energia, de modo confiável e seguro, desde os centros geradores até os consumidores dessa energia. As principais dificuldades no fornecimento dessa energia estão relacionadas a fatores que vão desde a dinâmica do sistema elétrico à forma de utilização dessa energia.

Na implantação dos primeiros sistemas elétricos, existiam basicamente apenas cargas indutivas, capacitivas e resistivas, as quais causavam relativamente pouca interferência em outros consumidores. A dinâmica dos processos era lenta e as cargas eram pouco sensíveis aos distúrbios originários da rede elétrica, não implicando em prejuízos significativos.

Com o avanço tecnológico, a multiplicação das aplicações eletrônicas em todos os campos de atividades humanas, modificou o hábito dos consumidores e sua dependência quanto ao fornecimento da energia elétrica. Os consumidores, principalmente os industriais e comerciais, por necessidade de aumento da produtividade, melhoria no fluxo de informações e redução de custos, mudaram o perfil de suas plantas introduzindo sistemas automatizados. O perfil das cargas se modificou, abrangendo também os consumidores domésticos.

Esse novo perfil de cargas criou exigências maiores quanto ao fornecimento de energia, de modo que distúrbios da rede elétrica que antes não eram críticos passaram a ser determinantes da produtividade de processos industriais e dos ciclos de trabalho em atividades domésticas e comerciais. O novo perfil das cargas não só afetou os consumidores, mas também as concessionárias de energia.

Apesar dos estudos de distúrbios oriundos da rede elétrica e das cargas não lineares já estarem na pauta mesmo antes da década de 70, apenas na década de 90 surgiu pela primeira vez o termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) como vem sendo utilizado atualmente. Conceitualmente a QEE tem por objetivo balizar parâmetros mínimos de fornecimento de energia elétrica e os máximos distúrbios permissíveis gerados pelos consumidores, tomando como básicas condições ideais de fornecimento e o perfil ideal de cargas para os consumidores.

Assim, QEE expressa, através de indicadores qualitativos e quantitativos, as condições de fornecimento de energia elétrica pelos diversos agentes do setor elétrico (geradoras, transmissoras, distribuidoras e comercializadoras) até os consumidores, buscando caracterizar a continuidade de suprimento e conformidade das formas de onda de tensão e corrente, sempre observando as condições consideradas adequadas para o bom desempenho do sistema elétrico e que atenda às necessidades de todos os agentes envolvidos.

De forma geral, os parâmetros e indicadores utilizados para caracterização dos distúrbios da QEE são relacionados às harmônicas, às flutuações de tensão, aos desequilíbrios de tensão, às variações de frequência e às variações de tensão de curta duração (VTCDs), sendo esta última o objeto de estudo deste trabalho e que será abordado brevemente a seguir.

1.1 Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Diferentes normas internacionais: IEEE, CENELEC, Sul-Africana, entre outras, denominam os distúrbios de afundamento e elevação de tensão e interrupção de tensão, respectivamente de “voltage sag” ou “voltage dip”, “voltage swell” e “voltage interruptions” e sua faixa de duração varia de norma para norma, mas aplica-se de meio (0,5) ciclo da tensão fundamental a 3 minutos [1,2,33,34,35].

A denominação “Variação de Tensão de Curta Duração”, ou simplesmente VTCD, é uma definição da norma brasileira que engloba os distúrbios citados, interrupções, afundamentos e elevações de tensão, desde que tenham duração entre um ciclo de 60Hz e 1 minuto.

A importância do estudo das VTCDs está no fato de que, de todos os distúrbios existentes e que ocorrem na rede elétrica, é o que apresenta maior ocorrência e de rápida percepção por parte dos consumidores, pois de imediato geram prejuízos que podem ser quantificados de alguma maneira, Figura 1.1.

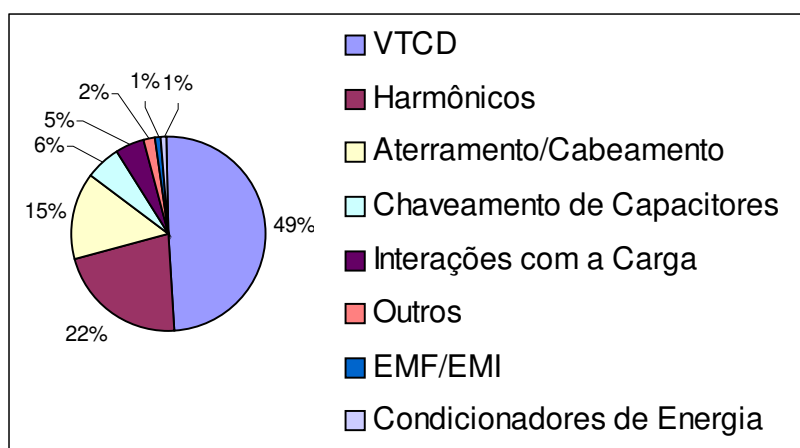


Figura 1.1 – Frequência de Ocorrência de Distúrbios nos E.U.A [14]

Os consumidores normalmente mais afetados são aqueles que apresentam em suas plantas processos sensíveis, no setor industrial: têxtil, papel-celulose, químicas, petroquímicas farmacêuticas, indústrias de semicondutores e, no setor comercial: bancos, financeiras, centrais de processamento de dados (CPDs) e as empresas de tecnologia da informação (TI).

Os prejuízos observados nos consumidores industriais vão desde simples paradas nos processos produtivos, que podem ser de alguns minutos, horas ou dias, até perda de lotes inteiros de produção e queima de equipamentos.

Nos consumidores comerciais, tem-se implicações de perda de transações e de dados, aumento no tráfego da rede de informação por necessidade de retransmissão de dados e até altos prejuízos financeiros por danos a clientes.

Para mitigar o problema das VTCDs, normalmente são empregadas técnicas custosas, o que obriga tais consumidores a protegerem parte dos seus processos que consideram mais críticos, deixando outros pontos vulneráveis às VTCDs. A solução mais utilizada é o emprego de UPS (Uninterruptible Power Supply) em conjunto com grupos motogeradores diesel, que atendem às cargas consideradas críticas [31].

As concessionárias, diante das novas características dos consumidores, vêm-se obrigadas a melhorar a qualidade de fornecimento, seja por motivos contratuais, perda de consumidores industriais antigos e novos e até mesmo por ações judiciais devido a prejuízos supostamente causados por ela ou por negligência no atendimento de normas regulamentadoras, quando vigentes.

As principais causas das VTCDs estão relacionadas a curto-circuitos, manobras de rede, atuação indevida da proteção e instabilidade ambiental.

Normalmente, os curto-circuitos são causadores de afundamentos de tensão, podendo ter como consequência a elevação de tensão, dependendo do tipo de curto-circuito ocorrido. Os efeitos não se limitam unicamente ao ponto da falta, mas se propagam pela rede elétrica atingindo uma determinada região dependendo das características da rede elétrica, sendo que o centro

crítico é o ponto do curto circuito.

As manobras de rede sejam elas automáticas ou manuais, normalmente são causadoras de afundamentos de tensão. Quando a manobra é realizada de forma programada e correta ocorrem distúrbios momentâneos, porém uma manobra mal realizada pode causar interrupção ou um curto-circuito. Importante perceber que os distúrbios de VTCDs são inerente ao sistema, porém deve-se sempre procurar minimizar e melhorar as manobras necessária com a finalidade de aumentar a qualidade de desempenho da rede elétrica de modo a minimizar os distúrbios de VTCD. Exemplos de manobras são: comutação para transferência de linha, comutação para “by-pass” e manobras para realização de manutenção.

A atuação indevida da proteção é normalmente causadora de afundamentos e interrupções e, em alguns casos de elevações dependendo do tipo de ocorrência na rede elétrica. A atuação indevida de proteção normalmente está relacionada à falta de manutenção, calibração incorreta da proteção, atuação indevida por inadequação do equipamento (refere-se a distúrbio em que a proteção não está preparada para identificá-lo ou identifica de forma incorreta).

As condições climáticas, tais como: chuva, vento e descargas eletromagnéticas, são causadores de afundamentos, surtos (transitórios) e elevações de tensão. Os distúrbios relacionados a esse tipo de causa são de difícil controle, pois sua parametrização e variáveis relacionadas são muitas e de difícil identificação.

Observando-se a questão de VTCDs, perceber diversos e amplos campos de estudos relacionados a tal distúrbio, desde a identificação, classificação, modelagem que vão das fontes causadoras de VTCD, estudo de propagação dos distúrbios, classificação de regiões críticas, até a verificação dos efeitos da VTCD nas cargas dos consumidores, bem como o estudo de técnicas para mitigação ou redução de seus efeitos.

Esses estudos não se limitam à área puramente técnica; existem aspectos econômicos e legais que ainda são obscuros, ou seja, meios de quantificar, identificar e apurar fatos e responsabilidades, de modo a estabelecer metodologias de apuração e caracterização de prejuízos e técnicas para identificação das fontes causadoras de problemas, garantindo uma forma justa para apuração de problemas de VTCD e aplicação de penalidades nos agentes envolvidos.

1.2 Motivações e Objetivos do Trabalho

Uma das grandes deficiências encontradas no estudo de VTCD está relacionada à avaliação do impacto real de um evento sobre as cargas dos consumidores. É comum encontrar na literatura, técnicas para caracterização dos distúrbios de VTCD e também métodos empíricos para caracterização da sensibilidade, limites de tolerância das cargas a tais distúrbios, mas dificilmente são encontrados estudos relacionando os distúrbios de VTCD com os seus efeitos, identificando nos equipamentos os fatores determinantes dos consumidores para saber se uma VTCD causará uma reação da mesma.

Assim, baseada nas deficiências das metodologias atuais de caracterização de distúrbios, que não conseguem relacionar uma VTCD com os efeitos sobre os equipamentos dos consumidores, e na falha dos métodos empíricos para determinação da sensibilidade de uma

carga a VTCD, surgem as idéias propostas neste trabalho.

Observadas as limitações apresentadas, este trabalho procurou contribuir para os estudos sobre o impacto de VTCD em uma família de cargas de ampla difusão, os equipamentos eletrônicos alimentados por fontes CC (conversores CA-CC do ponto de vista da rede elétrica), buscando conhecer as características destes tipos de cargas frente a esses distúrbios de tensão e assim, propor técnicas de ensaios e de parametrização das cargas em estudo e elaborar uma metodologia para avaliação do impacto de VTCD sobre essa família de equipamentos.

Deste modo, os principais objetivos do presente trabalho são:

1. Discutir e analisar as normas atuais, procurando mostrar seus pontos comuns (convergências) e suas diferenças (particularidades).
2. Relacionar o comportamento das cargas em estudo com VTCD.
3. Determinar os parâmetros relevantes das cargas em estudo frente a VTCD.
4. Propor técnicas de extração dos parâmetros e caracterização das cargas, através de ensaios em equipamentos reais.
5. Com base no que for determinante para a família de cargas abordada, propor uma metodologia de avaliação do impacto de VTCD.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação, observando-se o que foi descrito no item anterior, está dividida da seguinte maneira:

O *Capítulo 1* apresentou um panorama geral e a relevância dos estudos relacionados à VTCD e também apresentou as motivações e objetivos desse trabalho.

O *Capítulo 2* irá apresentar as principais normas relacionadas à caracterização de VTCD e de verificação de impacto sobre uma família de cargas, procurando mostrar seus pontos comuns, convergências e suas particularidades, sempre buscando fazer uma análise crítica de tais normas, observando-se suas vantagens e desvantagens.

O *Capítulo 3* dará as bases gerais para caracterização das cargas eletrônicas alimentadas por fontes CC frente a VTCD, apresentando modelos que consigam representar o comportamento dessas cargas tanto em regime permanente, bem como durante os distúrbios em estudo (VTCDs).

O *Capítulo 4* irá apresentar os parâmetros relevantes de uma carga sensível frente a VTCD, também irá apresentar técnicas para extração desses parâmetros e do modelo que represente uma carga eletrônica real. Um indicador para avaliação de VTCD será proposto e finalmente será feito um paralelo com as normas existentes.

O *Capítulo 5* utilizará as abordagens feitas nos capítulos 3 e 4, confrontando simulações com respostas reais de três ensaios com equipamentos, de modo a validar os modelos que serão apresentados e metodologia proposta para avaliação do impacto de VTCD.

O *Capítulo 6* apresentará as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Normas e Recomendações Aplicáveis a VTCD

Neste capítulo serão abordadas as normas e recomendações que vêm sendo empregadas, procurando mostrar sua utilização na identificação e classificação de distúrbios do tipo VTCDs. É importante salientar que apesar de existirem diferentes propostas e abordagem para a análise de VTCDs, existe uma convergência na metodologia a ser empregada. Neste capítulo serão explanados os modos de utilização dessa metodologia, as variações existentes, as suas qualidades e deficiências.

O estudos de impacto de VTCDs já eram realizados muito antes de surgirem as atuais definições no contexto de qualidade de energia. Sua importância tornou-se crescente devido à necessidade dos consumidores e concessionárias de energia identificarem se as perdas ocorridas eram causadas por procedimentos e operações dos consumidores ou se eram advindas da rede elétrica das concessionárias, com a finalidade de atribuir responsabilidades.

Neste novo panorama, a necessidade de se monitorar, medir, classificar e verificar suas consequências ganha grande importância e diferentes metodologias foram propostas para identificação e quantificação (caracterização do evento) de VTCDs, como, por exemplo:

- Caracterização por Perda de Tensão [12,13];
- Caracterização por Perda de Energia [12,13];
- Método de Bollen [1,13,27];
- Caracterização EPRI/Electrotek [12,13,29];
- Método da Magnitude e Duração do Evento (M&D) [1,2,12,13].

Para a caracterização do evento de VTCD também são propostos índices que definem o grau de “severidade”, de modo a diferenciar o impacto de tais eventos, e para verificação do impacto sobre as cargas dos consumidores.

Nestas circunstâncias as concessionárias têm necessidade de avaliar seus sistemas de modo a quantificar e evidenciar os pontos críticos em suas redes elétricas. Diferentes propostas surgem para gestão dos sistemas elétricos de potência (SEP), sendo algumas dessas metodologias:

- Detroit Edison [12,13];
- UNIPED [1,13];
- Incidência Acumulada de Eventos [12];
- EPRI/Electrotek [1,12,13,29];

Todas as metodologias acima relacionadas para caracterização do evento apresentam um ponto em comum que é o de analisar exclusivamente o evento. Não existe análise de tal caracterização em relação às cargas envolvidas, famílias de cargas, ou tipo de consumidores. A caracterização, observando-se exclusivamente o evento, gera uma ambigüidade que está relacionada ao sentimento dos consumidores: “Qual evento realmente tem impacto sobre as minhas cargas?”; e nas concessionárias de energia elétrica: “Tais caracterizações são capazes de demonstrar que o evento gerado na rede causará danos aos consumidores?”.

Desta maneira existe uma lacuna que relacione a caracterização do evento, com seu real impacto sobre as cargas dos consumidores, ou seja, o estudo do comportamento dos equipamentos frente a distúrbios de VTCD.

Com referência aos fabricantes de equipamentos, há duas associações que definiram limites de suportabilidade a VTCDs para os equipamentos por eles fabricados, e essas associações são: CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association) atual ITIC (Information Technology Industry Council) e a SEMI (Semiconductor Equipment and Materials Institute). Tais limites são definidos através de:

- Curva CBEMA/ITIC [1,2,12,13,37];
- Curva SEMI F47 [36];

A primeira está relacionada a fabricantes de equipamentos de tecnologia de Informação (TI) e a segunda é aplicável a equipamentos e processos da indústria de semicondutores.

Neste capítulo serão abordadas: a metodologia da Magnitude e Duração do Evento (M&D), as diferenças nas normas nacionais e internacionais, as deficiências de tal metodologia na caracterização dos eventos e na verificação do impacto real sobre famílias de cargas como as relacionadas a ITIC e a SEMI.

Não é parte deste trabalho o estudo dos métodos para avaliação de desempenho no SEP, mas sim dar novas bases na avaliação da metodologia vigente e relacionar os distúrbios de VTCD com seu real impacto sobre equipamento de consumidores.

2.1 Metodologia da Magnitude e Duração do Evento (M&D)

A metodologia da Magnitude e Duração do Evento (M&D) caracteriza um evento de VTCD por dois parâmetros como próprio nome da metodologia já explicita: a magnitude e a duração.

Todas as normas utilizam-se do valor eficaz da tensão (V_{ef}) para verificar o desvio mais significativo da tensão, esse desvio define a magnitude do evento.

O valor eficaz da tensão, dado pelo valor quadrático médio por período, é mostrado na equação (2.1):

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) \cdot dt} \quad (2.1)$$

2.1.1 Americana IEEE – Std. 1159 e Brasileira Submódulo 2.2 [32,33]

A *Magnitude* (V_{Mag}) do evento, desvio mais significativo da amplitude de tensão, é definido segundo a norma americana e recomendação brasileira como sendo:

Nível extremo do valor eficaz da tensão, tensão residual ou remanescente (V_{res}), em relação à tensão nominal (V_n) no ponto de observação, expresso em porcentagem (%) ou valor por unidade (pu).

$$V_{Mag} = \frac{V_{res}}{V_n} (pu) \quad \text{ou} \quad V_{Mag} \% = \frac{V_{res}}{V_n} \cdot 100 (\%) \quad (2.2)$$

A *Duração* (Δt) do evento é definida como:

O intervalo de tempo decorrido entre o instante (t_i) em que o valor eficaz da tensão ultrapassa determinado limite de referência (V_{ref}) e o instante (t_f) em que a mesma variável volta a cruzar esse limite, expresso em segundos ou ciclos da fundamental.

$$\Delta t = t_f - t_i \quad (\text{segundos ou ciclos}) \quad (2.3)$$

Na Figura 2.1 é apresentado um exemplo da caracterização de um afundamento de tensão, em que a magnitude do evento é de $\Delta V \cong 32,0 \%$ ou $\Delta V \cong 0,32 \text{ pu}$ e duração de $\Delta t \cong 92,0 \text{ ms}$ (5,52 ciclos).

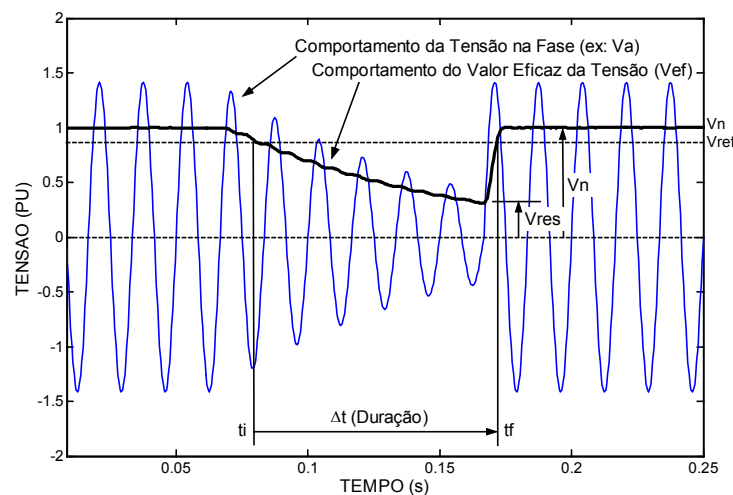


Figura 2.1 - Caracterização de um Afundamentos de Tensão Normas Brasileira e Americana.

A recomendação brasileira, submódulo 2.2, dos procedimentos de rede é aplicável à rede básica do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Não existe definição até o presente momento para as redes de distribuição das concessionárias. O órgão regulador de energia elétrica, ANEEL, ainda não definiu os procedimentos de distribuição (Prodist), que se encontra em desenvolvimento.

2.1.2 Européia EN 50160 e Sul-Africana NRS-048 [34,35]

Tanto a norma européia como a sul-africana caracterizam uma VTCD pela M&D do evento, porém a maneira como é caracterizada a magnitude difere um pouco da americana e brasileira:

A *Magnitude* de uma VTCD é definida como:

A diferença entre o valor nominal da tensão (V_n) e o extremo do valor da tensão eficaz da tensão residual (V_{res}), normalmente expressa em porcentagem (%) ou valor por unidade (pu).

$$V_{Mag} = \frac{V_n - V_{res}}{V_n} (pu) \quad \text{ou} \quad V_{Mag} \% = \frac{V_n - V_{res}}{V_n} \cdot 100 (\%) \quad (2.4)$$

A diferença entre o valor nominal e o valor residual da tensão, também é definida como tensão de afundamento “*Voltage Dip* (V_{Dip})”.

$$V_{Dip} = V_n - V_{res} \quad (V) \quad (2.5)$$

Uma diferença da norma européia e sul-africana é a não caracterização e classificação de eventos de elevação de tensão.

A *Duração* do evento é definida da mesma maneira que a norma americana e recomendação brasileira, conforme item 2.1.1, equação (2.3).

Na Figura 2.2 é apresentado o mesmo evento da Figura 2.1, a magnitude é determinada pela equação (2.4), assim $\Delta V \cong 68,0 \%$ ou $\Delta V \cong 0,68 pu$ e duração de $\Delta t \cong 92,0 ms$ (5,52 ciclos).

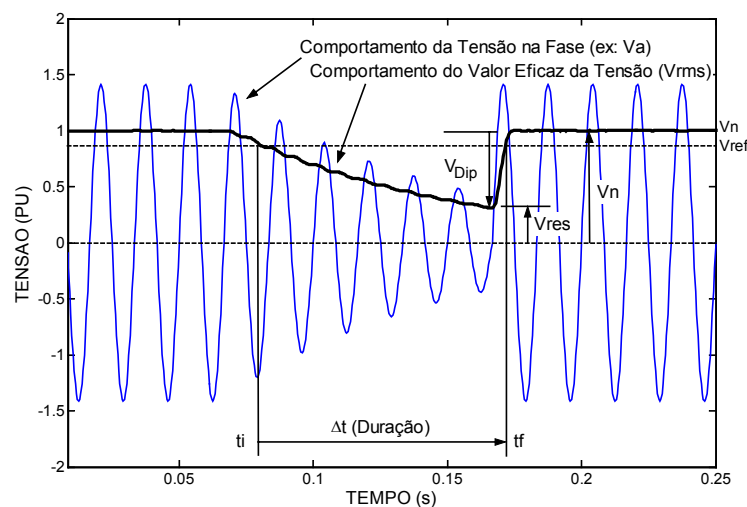


Figura 2.2 - Caracterização de um Afundamentos de Tensão Normas Européia e Sul-Africana.

2.2 Classificação dos Eventos de VTCD

As VTCDs são eventos de afundamento e elevação de tensão com duração de 0,5 ciclos a alguns minutos, dependendo da norma a ser utilizada.

Algumas diferenças irão ser evidenciadas neste item, por exemplo, tanto as normas européia e sul-africana não classificam os distúrbios de VTCD com relação a elevações de tensão, isto será mostrado no decorrer deste capítulo.

Outra dificuldade de classificação se refere a transitórios com duração menor que 1 ciclo da tensão fundamental da rede elétrica, os surtos e transitórios rápidos de tensão. Esses distúrbios são de difícil identificação e classificação principalmente os distúrbios oscilatórios, que não podem ser definidos nem como afundamento e nem como elevação de tensão.

Esta parte de classificação, que todas as normas de alguma maneira fazem, em termos práticos, não tem valor além do que concerne à denominação dos eventos em faixas, colocando-lhes uma nomenclatura.

2.2.1 Recomendação Brasileira do ONS - Submódulo 2.2 [32]

A referência brasileira oficialmente aprovada pela ANEEL no que se refere à qualidade de energia elétrica é o submódulo 2.2 dos Padrões de Desempenho da Rede Básica, desenvolvida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

O submódulo 2.2 foi constituído de modo a ser aplicado à rede básica, porém o mesmo é um indicativo de como pode vir a ser aplicado aos Procedimentos de Distribuição (Prodist), que serão as normas ou recomendações relacionadas à qualidade de energia aplicadas as redes de distribuição das concessionárias de energia elétrica brasileiras. O Prodist em sua versão preliminar apresenta as mesmas características básicas observadas no submódulo 2.2.

A denominação de VTCD só é encontrada na norma brasileira e engloba distúrbios de interrupção, elevação e afundamentos de tensão com duração compreendida entre 1 ciclo de 60 Hz a 1 minuto.

A Tabela 2.1 apresenta as denominações para VTCD e suas respectivas faixas de magnitude e duração.

Tabela 2.1 - Classificação das VTCD segundo Procedimentos de Rede do ONS [32]

Classificação	Denominação	Duração do Evento	Magnitude da Tensão
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior a igual a 1 minuto	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto	Superior a 1,1 pu

Verifica-se que não existe classificação para eventos transitórios com duração menor ou igual a um ciclo da tensão da rede elétrica. Uma possível razão é que não se pode caracterizar transitórios rápidos através do valor eficaz.

2.2.2 IEEE Std 1159 – Norma Americana. [33]

Na norma americana não existe um equivalente para VTCD, os afundamentos e elevações de tensão são denominados respectivamente de “voltage sag” e “voltage swell”. A Tabela 2.2 apresenta as denominações de VTCD segundo a norma americana e suas faixas de magnitude e duração.

Tabela 2.2 - Classificação das VTCD segundo IEEE - Std 1159 [1,33].

Classificação	Denominação	Duração do Evento	Amplitude do Evento
Variações de Curta Duração (Short duration variations)	Afundamento Instantâneo (Instantaneous sag)	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
	Elevação Instantânea (Instantaneous swell)	0,5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
	Interrupção Momentâneo (Momentary Interruption)	0,5 ciclo– 3 segundos	< 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo (Momentary sag)	30 ciclos – 3 segundos	0,1 – 0,9 pu
	Elevação Momentânea (Momentary swell)	30 ciclos – 3 segundos	1.1 – 1.4 pu
	Interrupção Temporária (Temporary Interruption)	3 segundos – 1 minuto	< 0,1 pu
	Afundamento Temporário (Temporary sag)	3 segundos – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
	Elevação Temporária (Temporary swell)	3 segundos – 1 minuto	1.1 – 1.2 pu
Variações de Longa Duração (Long duration variations)	Interrupção Sustentada (Interruption, sustained)	> 1 minuto	0,0 pu
	Subtensão (Undervoltage)	> 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
	Sobretensão (Overvoltage)	> 1 minuto	1.1 – 1.2 pu

Pela norma americana os transitórios de tensão são classificados basicamente em dois tipos:

- Transitórios impulsivos.
- Transitórios oscilatórios.

Importante notar que a caracterização de transitórios não é feita pelo valor eficaz da tensão. Os transitórios impulsivos são caracterizados pela magnitude e duração e para sua classificação só é observada a sua duração, Tabela 2.3:

Tabela 2.3 - Classificação de Transitórios Impulsivos segundo IEEE - Std 1159 [33].

Classificação	Denominação	Duração do Evento
Transitório (Transient)	Impulsivo de nanosegundos (Impulsive – Nanoseconds)	< 50 ns
	Impulsivo de microsegundos (Impulsive – Microseconds)	50 ns – 1 ms
	Impulsivo de milisegundos (Impulsive – Milliseconds)	> 1 ms

Os transitórios oscilatórios, segundo a norma americana, são sempre de frequência superior à frequência de fornecimento da rede elétrica, e de característica amortecida. Por esse comportamento, a sua caracterização é feita observando-se a magnitude, duração e a frequência do transitório oscilatório.

A Magnitude do transitório oscilatório é definido por dois valores em que é observado o maior valor de pico com e sem a componente fundamental (da rede elétrica).

A Duração é definida pelo instante em que o transitório oscilatório inicia e o seu término é definido pelo fim das oscilações. A norma americana não deixa claro como isto deve ser medido.

A Frequência, do transitório oscilatório, é definida pela componente de frequência mais baixa, ou seja, a fundamental da componente oscilatória, desconsiderando-se a frequência da rede.

A classificação de um transitório oscilatório, baseada na frequência primária observada, pode ser definida como: alta, média e baixa frequência, conforme Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Classificação de Transitórios Oscilatórios segundo IEEE - Std 1159 [33]

Classificação	Denominação	Duração do Evento
Transitório (Transient)	Oscilatório de Baixa Frequência (Oscillatory – Low Frequency)	< 5 kHz
	Oscilatório de Média Frequência (Oscillatory – Medium Frequency)	5 – 500 kHz
	Oscilatório de Alta Frequência (Oscillatory – High Frequency)	0,5 – 5 MHz

2.2.3 EN 50160 – Norma Européia (CENELEC) [34]

A norma europeia, com relação a VTCDs, apresenta abordagem para afundamentos de tensão, sendo estes denominados de “voltage dips”. As elevações de tensão não são abrangidas por tal norma, que se limita a definir tais eventos como: transitórios de sobretensão (“transient overvoltage”) e sobretensão temporária (“temporary overvoltage”), não especificando faixas de magnitude e duração. A Tabela 2.5 apresenta a classificação dos eventos de VTCD pela norma europeia.

Tabela 2.5 - Classificação das VTCDs segundo CENELEC - EN 50160 [1,34]

Denominação	Duração do Evento	Amplitude do Evento
Afundamento de Tensão (Voltage Dips)	0,5 ciclo – 1 minuto	0,01 – 0,9 pu
Interrupção de Curta Duração (Short Interruption)	0,5 ciclo – 3 minutos	< 0,01 pu
Interrupção de Longa Duração (Long Interruption)	> 3 minutos	< 0,01 pu
Transitório de Sobretensão (Transient overvoltage)	Não definido	> 1,1 pu
Sobretensão Temporária (Temporary overvoltage)	Não definido	> 1,1 pu

Como na norma brasileira, os transitórios de tensão também não são abordados pela norma europeia, a única conclusão que se consegue extrair é que estes são caracterizados com duração inferior a 0,5 ciclo da tensão fundamental.

2.2.4 NRS 048 – Norma Sul-Africana [35]

Como a norma europeia, a NRS 048-2, no que se refere a distúrbios de VTCD, só aborda os afundamentos de tensão, não contemplando as elevações de tensão. Estas são apenas citadas, indicando que serão tratadas em normas ou revisões futuras.

Os afundamentos de tensão também são denominados de “voltage dips”, a caracterização dos eventos é realizada da mesma maneira que na norma europeia.

Diferentemente das outras normas, na sul-africana não existe denominação dos afundamentos em função da sua caracterização. Os eventos são classificados em áreas denominadas de X, Y, Z, T e S, ou seja, um evento identificado é caracterizado e classificado como pertencente a uma dessas áreas, Figura 2.3.

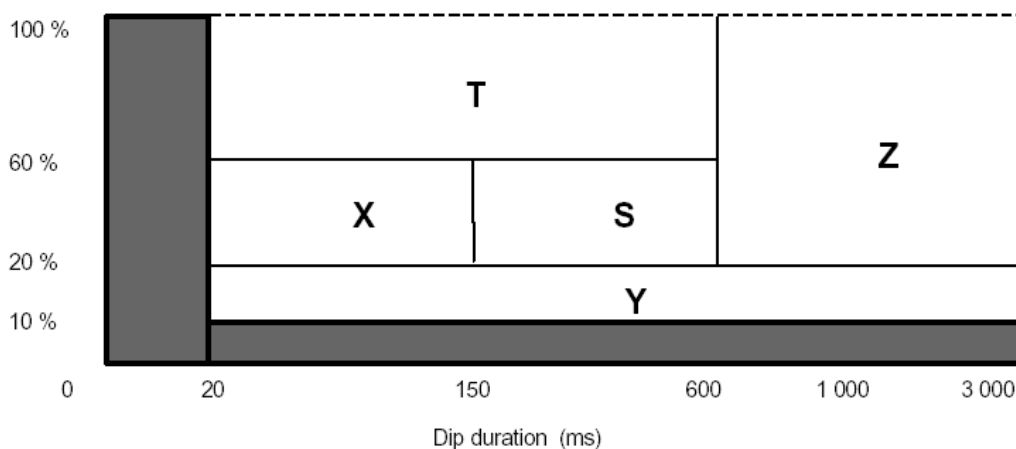


Figura 2.3 - Gráfico de Classificação de Afundamentos de Tensão Segundo Norma Sul-Africana[35].

Esta forma de classificação é então comparada com a Tabela 2.6 que indica o nível de compatibilidade de ocorrência dos eventos por ano em cada área.

Tabela 2.6 - Níveis de Ocorrência de Afundamentos de Tensão segundo Norma Sul-Africana [35].

1	2	3	4	5	6
Tensão da Rede (Vn) (ver nota 1)	Número de afundamentos por ano				
	Janela de categoria de afundamentos				
	Z	T	S	X	Y (ver nota 2)
$6.6 \text{ kV} \leq V_n \leq 44 \text{ kV}$	20	30	30	100	150
$6.6 \text{ kV} \leq V_n \leq 44 \text{ kV}$ (rural)	49	54	69	215	314
$44 \text{ kV} < V_n \leq 132 \text{ kV}$	16	25	25	80	120
$220 \text{ kV} < V_n \leq 765 \text{ kV}$	5	6	11	45	88
Notas					
1) A tensão da rede não necessariamente é a tensão do consumidor. A tensão mostrada pode ser a tensão de entrega no ponto de acoplamento. Por essa razão, os valores dos parâmetros Z, T, S, X e Y aplicáveis aos consumidores deve ser analisados caso a caso. Considerando a rede do consumidor.					
2) O número de afundamento em Y é proveniente da integralização de informações, porém não tem a intenção de regular sobre o ponto de entrega baseado no número de afundamentos em Y.					

Com relação a transitórios, estes não são abordados pela norma sul-africana e seguindo a mesma postura das normas européia e brasileira, existe apenas um indicativo de que serão abordados futuramente pela na norma NRS 048-2.

2.3 Limites de Tolerância de Equipamentos a VTCD

Como já foi dito anteriormente, existem pouco estudos relacionando as VTCDs e seus efeitos sobre as cargas de consumidores, que determinam de forma objetiva como os equipamentos reagem às VTCDs e quais os parâmetros das cargas e processos são determinantes para caracterizar se um evento de VTCD causa algum impacto sobre os consumidores.

O que normalmente é encontrado na literatura são ensaios empíricos, aplicação de eventos programados em uma família de equipamentos, e então é observada a resposta desses equipamentos extraíndo-se os limites de tolerância a VTCD (curva de sensibilidade ou tolerância), porém não é demonstrada a relação entre os distúrbios de VTCD e a resposta dos equipamentos (o real impacto sobre as cargas).

Por exemplo, a caracterização pela metodologia da M&D que pressupõe que todo equipamento responde pelo valor eficaz da tensão, o que não é real, especificamente para os equipamentos eletrônicos.

Outra prática que vem crescendo é a aplicação de forma indevida da metodologia da M&D com os limites de tolerância já definidos por normas, como é o caso da curva CBEMA/ITIC [37] e a curva SEMI F47 [36]. Tal correlação é incorreta, a M&D foi definida para caracterização do evento no contexto de QEE e os limites de tolerâncias são de utilização específica de fabricantes de equipamentos que utilizam tais limites como critérios de projeto para condições mínimas de suportabilidade dos equipamentos por eles fabricados.

A norma americana é a única, até o presente momento, que caracterizou limites de tolerância de equipamentos, caso da CBEMA/ITIC e da curva SEMI F47. As normas, européia, brasileira e sul-africana não citam e não indicam que adotarão os mesmos princípios ou algo similar ao proposto pela norma americana.

2.3.1 IEEE Std 446 (CBEMA/ITIC) [44]

A norma IEEE-446 aplicável a equipamentos eletrônicos e computadores, apresenta os limites de tolerância CBEMA (1985) [A1] desenvolvida pela “Computer Business Equipment Manufacturers Association - CBEMA”, hoje sendo denominada de “Information Technology Industry Council - ITIC”.

A curva original, que pressupõe afundamentos e elevações retangulares de tensão, apresentava as regiões de operação para os equipamentos eletrônicos e os limites mínimo e máximo que a tensão de alimentação da rede elétrica poderia variar sem que os equipamentos eletrônicos sofressem qualquer tipo de efeito, sejam eles de desligamento ou dano.

Após algumas modificações foi apresentada em 1997 uma nova versão para os limites de tolerância conhecida como CBEMA/ITIC ou simplesmente ITIC [37] e mostrada na Figura 2.4, sendo devidamente aprovada no ano de 2000, com os limites definidos para serem aplicados a equipamentos eletrônicos e computadores relacionados à tecnologia da informação (TI).

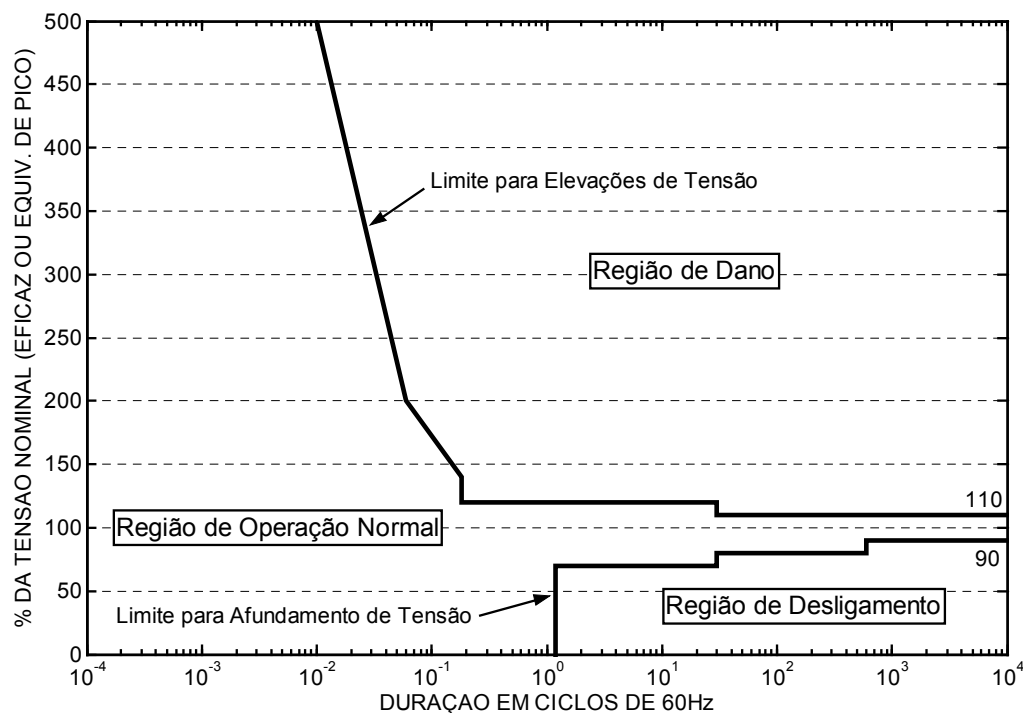


Figura 2.4 – Limites de Tolerância ITIC [37].

Os limites de tolerância estabelecidos pela ITIC estão sendo amplamente utilizados até por falta de outros limites por consumidores, principalmente os indústrias (química, petroquímica, papel e celulose, têxtil, bancos, entre outros), por servirem de balizamento para determinar se a parada ou dano em seus processos produtivos pode ou não ter sido causado por um distúrbio da rede elétrica das concessionárias de energia elétrica. Esta necessidade de mensurar os motivos de quebra do processo produtivo decorre da necessidade de reduzir os prejuízos causados e também de apurar as causas, motivos e responsabilidades. Esta última necessariamente envolveria as concessionárias de energia elétrica.

A norma IEEE Std 446 é uma das poucas normas que apresenta limite para elevações de tensão, não existe em nenhuma outra norma citação de limite semelhante e com o mesmo propósito.

2.3.2 SEMI F47 [36]

O limite de tolerância da SEMI F47, desenvolvido e apresentado pelo “Semiconductor Equipment and Materials Institute - SEMI”, abrange apenas os distúrbios de afundamento de tensão, não contemplando as elevações de tensão. Esta norma é aplicada a equipamentos e processos ligados a fabricantes de semicondutores para verificar a imunidade contra afundamentos de tensão. Um ponto peculiar nesta norma é que os processos dos fabricantes devem atender os limites estabelecidos pela SEMI F47 sem a utilização de suprimento auxiliar de energia, como por exemplo, UPS (Uninterruptable Power Supply ou No-Breaks).

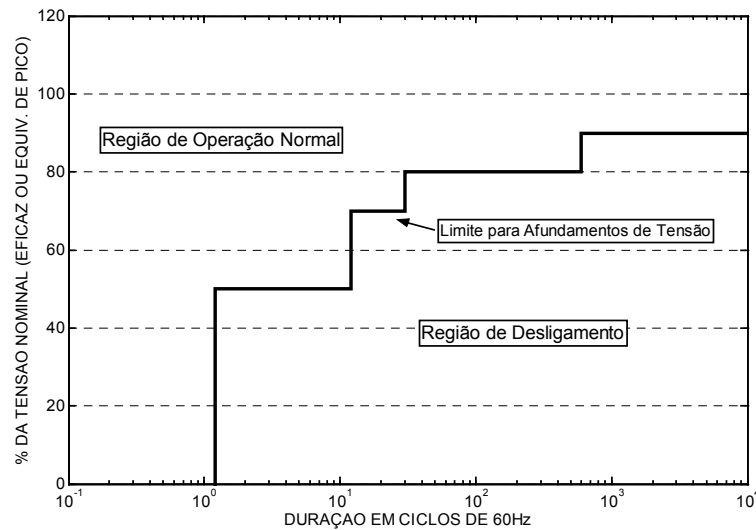


Figura 2.5 - Limites de Tolerância SEMI F47 [36].

2.4 Análise Crítica da Metodologia da Magnitude e sua Aplicação a VTCD em Geral

A grande vantagem da metodologia da M&D do evento é a simplicidade de aplicação e entendimento, porém nesta simplicidade é que estão os problemas relacionados à caracterização dos distúrbios de VTCD. Como será demonstrado, também não é um método confiável para se avaliar o impacto sobre cargas, pois eventos totalmente diferentes podem ter a mesma magnitude e duração, mas seus impactos podem ser completamente distintos. Essas deficiências de caracterização e sua relação com as cargas serão discutidas nesse item, entre outros problemas.

2.4.1 Eventos Distintos com mesma Magnitude e Duração

Na Figura 2.6 tem-se dois eventos de afundamento de tensão com características bem distintas. O evento 01, Figura 2.6 (a) é um evento retangular, muito mais crítico que o evento 02, mostrado na Figura 2.6 (b), com abrupto decaimento e que se recupera ao longo do tempo.

Pela metodologia da M&D os dois eventos seriam considerados iguais, mesma magnitude e duração ($M = 40\%$ e $D = 6$ ciclos). Aplicados, por exemplo, ao limites da ITIC, Figura 2.7, seriam considerados de mesmo grau de impacto o que também não é real.

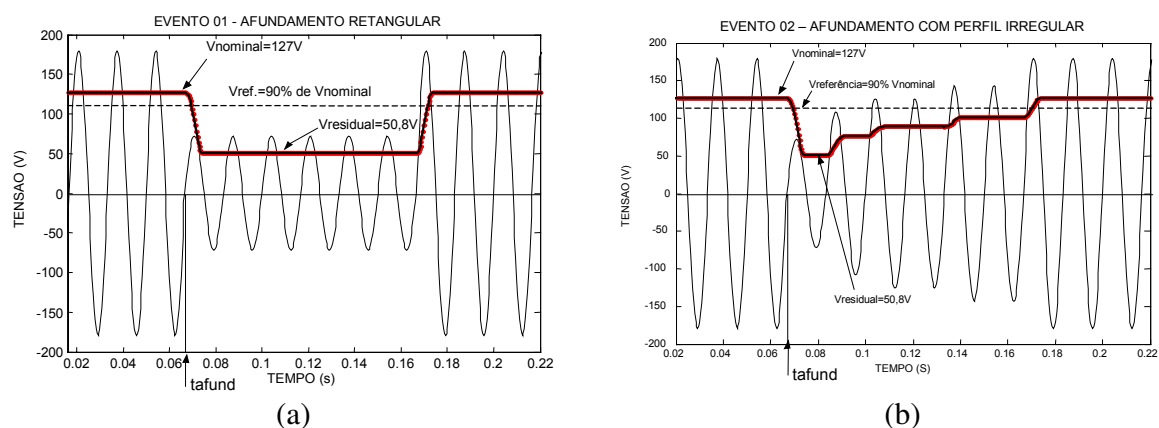


Figura 2.6 - Eventos de Afundamento de Tensão com mesma Magnitude e Duração

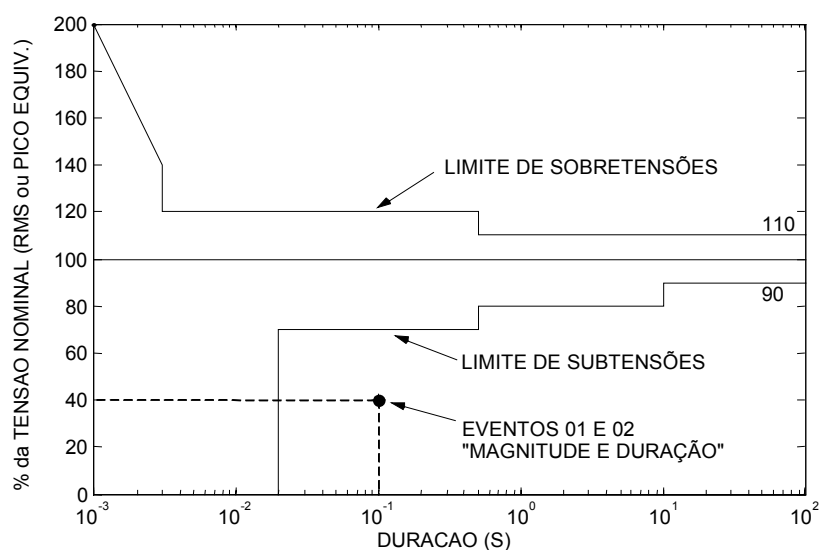


Figura 2.7 - Eventos 01 e 02 Distintos com mesma Representação de M&D.

2.4.2 Dinâmica Lenta do Cálculo do Valor Eficaz – Janela de 1 Ciclo

O cálculo do valor eficaz da tensão como mostrado na equação (2.1), é uma média quadrática com período T . Em aplicações de instrumentação utilizando-se técnicas de processamento digital de sinais, o valor eficaz da tensão pode ser definido conforme equação (2.6) [1,3,12,17].

$$V_{ef}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} v^2[k-n]} \quad (2.6)$$

N número de amostras da janela móvel

$v[k]$ k -ésima amostra da tensão

A utilização da equação (2.6) baseia-se numa janela móvel de N amostras no período de integração, equação (2.7), calculados de modo contínuo, atualizando-se a janela móvel amostra a amostra.

$$T = N \cdot ta \quad (2.7)$$

ta taxa de amostragem

A atualização contínua das amostras no cálculo do valor eficaz mostra que existe um período de convergência de N amostras que normalmente é o próprio período da fundamental da rede elétrica, no caso do Brasil, 60Hz. Esse período de convergência insere um erro na avaliação da duração de um evento, como mostrado na Figura 2.8. Na interrupção com duração de 1 ciclo, é possível perceber que o valor eficaz da tensão levou 1 ciclo para atingir o valor da interrupção e após o restabelecimento da tensão de entrada o valor eficaz levou mais 1 ciclo para voltar ao valor da condição normal de operação.

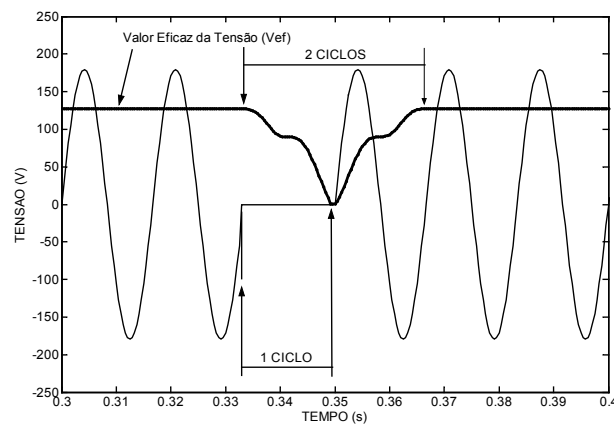


Figura 2.8 - Resposta do Valor Eficaz para Janela Móvel de 1 Ciclo.

Assim, para qualquer distúrbio de VTCD, a duração apresentada pelo valor eficaz da tensão acrescentará 1 ciclo na duração do evento. Esse erro é mais crítico em evento de curta duração pois o erro de 1 ciclo torna-se significativo, como no caso da Figura 2.8. Esse erro pode ser observado na norma brasileira já que considera o menor distúrbio de VTCD quando seu valor for maior ou igual a 1 ciclo.

Agora, considerando a norma européia e americana nas quais o menor evento classificado como VTCD teria duração maior ou igual a 0,5 ciclo e supondo a utilização de uma janela móvel de um ciclo, teríamos um novo problema na avaliação do distúrbio, além do descrito anteriormente, na duração do evento. Devido ao tempo de convergência, eventos menores que 1 ciclo não são avaliados corretamente quanto à sua magnitude, justamente porque a janela móvel, sendo uma média quadrática de 1 ciclo, nunca será preenchida por completo, não conseguindo atingir o valor correto de magnitude, como no caso da Figura 2.9, para uma interrupção de 0,5 ciclo.

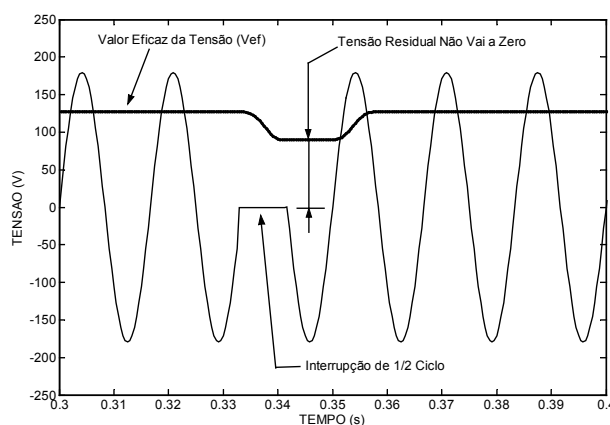


Figura 2.9 - Janela Móvel de 1 Ciclo e Interrupção de 0,5 Ciclo.

Poderia ser sugerida a utilização da janela móvel de meio ciclo, diminuindo o erro na avaliação da duração e o valor da magnitude atingiria o valor correto, mas isso também pode não ser adequado, e é o que será discutido a seguir.

2.4.3 Assimetria de 1/2 Onda - Cálculo do Valor Eficaz – Janela de 1/2 Ciclo

Utilizando-se uma janela de meio ciclo, o problema de convergência ainda existiria, porém o erro na avaliação de uma VTCD se reduziria a 0,5 ciclo, e este erro ainda seria significativo para VTCD com valores pequenos de duração, Figura 2.10.

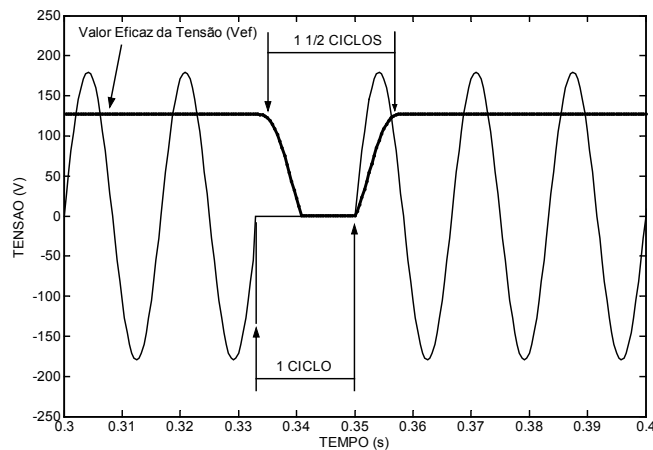


Figura 2.10 - Resposta do Valor Eficaz para Janela Móvel de 0,5 Ciclo.

A utilização da janela móvel de 0,5 ciclo ainda apresenta outro problema que está relacionado à assimetria de meia onda, ou seja, o semi-ciclo positivo ser diferente do semi-ciclo negativo. Na Figura 2.11 é mostrada a tensão de entrada com 2ª harmônica em que seu valor é 20% da fundamental. Devido à assimetria de meia onda causada pela 2ª harmônica, o valor eficaz da tensão torna-se oscilante o que não ocorreria se a janela móvel aplicada fosse de 1 ciclo do período da fundamental.

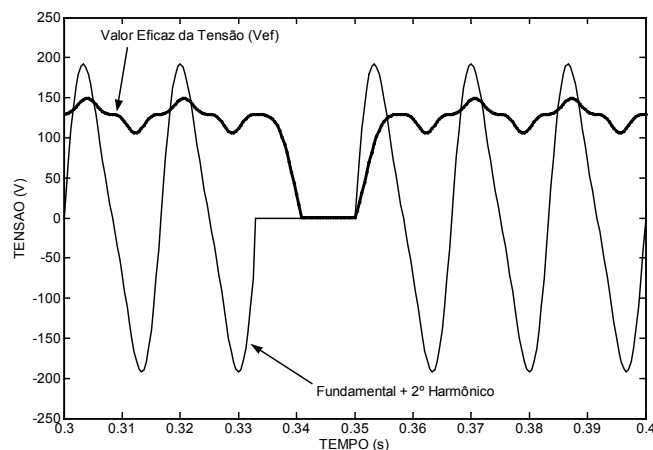


Figura 2.11 - Janela de 0,5 Ciclo e Assimetria de Meia Onda (Fundamental + 2ª harmônica).

2.4.4 Cargas que Não Respondem pelo Valor Eficaz da Tensão

Apesar de existirem estudos empíricos e ensaios para determinação dos limites de tolerância de cargas frente a VTCDs, existem poucos estudos relacionando tais ensaios com as respostas ocorridas nas cargas, ou seja, não se estudam as cargas de modo a determinar o que leva uma VTCD a causar impacto sobre as mesmas.

Neste ponto deve-se enfatizar que metodologia da M&D só poderia ser aplicada a eventos retangulares, pois essa metodologia não permite tirar conclusões sobre o impacto causado pelos eventos não retangulares sobre as cargas referenciadas pelas curvas CBEMA, ITIC e SEMI F47 de cargas conhecidas.

A utilização do valor eficaz da tensão de modo generalizado também é um equívoco, pois muitas cargas são influenciadas por fatores diferentes da resposta térmica (valor eficaz). Equipamentos eletrônicos, por exemplo, tem resposta baseada na dinâmica das fontes CC, motores elétricos aplicados à indústria de papel e celulose, têxtil, provavelmente estão relacionados aos limites máximos de variação de velocidade e inércia das cargas por eles tracionadas, entre outros.

Assim, os limites de tolerância a VTCD devem ser relacionados com os parâmetros relevantes dos equipamentos e processos e a avaliação através de indicadores deveria se basear na resposta dinâmica dos mesmos. Este tipo de abordagem converge para que sejam criadas famílias de cargas, em que limites de tolerância e indicadores específicos sejam utilizados para caracterizar de forma fidedigna o impacto da VTCD.

Este trabalho irá tratar de equipamentos eletrônicos alimentados por fontes CC que a rede elétrica percebe como conversores CA-CC. Assim, serão evidenciadas as diferenças citadas em que tais tipos de cargas respondem predominantemente pela dinâmica dos capacitores (filtro capacitivo) existentes nestas fontes.

A Figura 2.12 mostra duas formas de onda de tensão, ambas contém a 5ª harmônica, porém uma invertida da outra, em (a) a fase é de 0° e em (b) a fase é de 180° . O que se percebe em (a) e (b) é que os valores eficazes das duas formas de onda são iguais, ou seja, qualquer afundamento de tensão que fosse igual tanto em (a) quanto em (b) teriam o mesmo valor de magnitude, porque a evolução do valor eficaz se dá da mesma maneira.

Porém, supondo-se que tais tensões (a) e (b) foram aplicadas a uma carga eletrônica com uma fonte CC e admitindo-se que esta responda à tensão $v_C(t)$ dos capacitores, é possível notar que a dinâmica de $v_C(t)$ do gráfico (a) é diferente de $v_C(t)$ do gráfico (b). Assim uma VTCD afetaria de modo diferente o equipamento eletrônico somente pelo motivo de as componentes harmônicas terem diferença de fase. Nos gráficos da Figura 2.12 pode-se perceber dois efeitos que não são caracterizados pelo valor eficaz da tensão: o primeiro é que o equipamento responde pelo valor $v_C(t)$ e o segundo é que a composição harmônica e suas fases podem afetar o equipamento de modo distinto. Este último torna-se relevante principalmente porque muitos afundamentos de tensão perdem a característica senoidal da tensão.

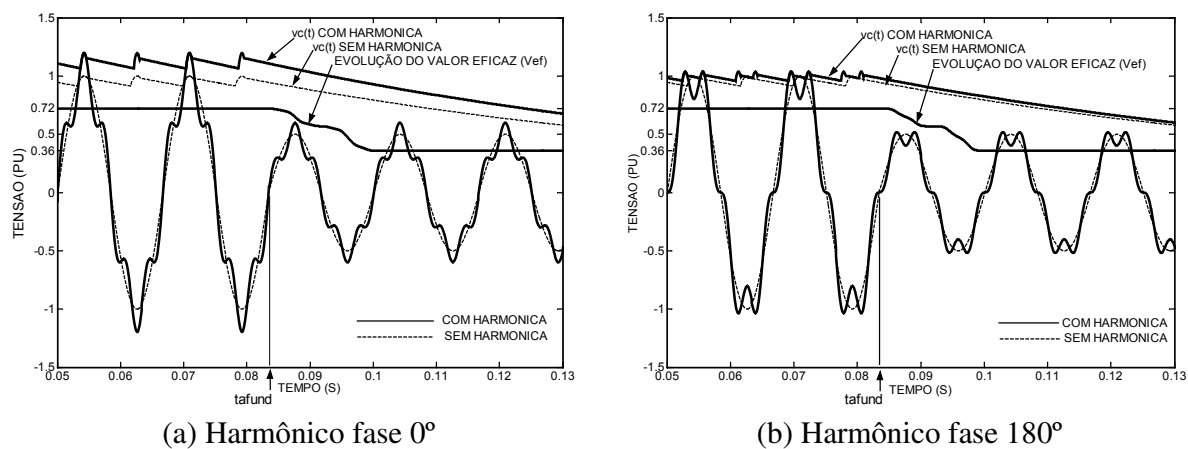


Figura 2.12 – Cargas que Não Respondem ao Valor Eficaz e Influência de Harmônicos.

As diferenças observadas e o impacto que causam nas curvas $v_c(t)$ e conseqüentemente nos equipamentos eletrônicos ficarão mais evidentes nos Capítulos 3, 4 e 5 a seguir.

Capítulo 3

Modelagem de Cargas Eletrônicas Alimentadas por Fonte CC.

Tradicionalmente o impacto causado pelas VTCDs tem sido avaliado apenas em função de parâmetros extraídos dos eventos observados na rede, independente das características das cargas afetadas. Os parâmetros básicos considerados são a máxima amplitude da variação e o tempo que a tensão eficaz da rede permaneceu fora da faixa de tensões de suprimento definida como aceitável. Esse método é conhecido como: Magnitude e Duração do Evento (M&D).

Seu uso difundido deve-se certamente à facilidade de aplicação, tanto para interrupções momentâneas de fornecimento como para afundamentos e elevações temporárias. Esse método de avaliação tem sido eficaz quando se trata de avaliar o impacto de falhas na rede como curto-circuitos, balanceados ou não, uma vez que grande parte desses eventos causa afundamentos ou elevações sustentados das tensões (variações eficazes das tensões em forma retangular). Assim, a magnitude e duração da violação, de fato, caracterizam o evento satisfatoriamente.

Face à sensibilidade das cargas às variações de tensão e devido à resposta mais rápida dos componentes eletrônicos aos distúrbios da rede, esses dois parâmetros não são mais suficientes para avaliar o impacto que um evento causa sobre uma carga, um sistema ou um processo. Atualmente torna-se cada mais importante levar em conta as características específicas das cargas para saber que tipo de impacto será causado por um determinado evento. Fica claro porque se

tornou tão importante aperfeiçoar os mecanismos de avaliação do impacto causado pelos distúrbios da rede sobre cargas sensíveis.

3.1 Cargas Alimentadas através de Fonte CC

O estudo, que será apresentado a seguir, irá se concentrar na caracterização da sensibilidade de cargas eletrônicas, equipamentos eletrônicos, normalmente constituídos de duas partes: fonte de alimentação e o SED (Sistema Eletrônico Dedicado), sistema eletrônico construído com finalidade pré-definida para execução de determinada tarefa, função a que foi destinado.

A opção por esse tipo de carga é simples por se tratar de cargas sensíveis, que podem ser encontradas tanto em ambientes residenciais (equipamentos eletrônicos domésticos), comerciais (equipamentos eletrônicos de escritórios, bancos e redes de lojas) como industriais (CLP - controle de processos, ADS - controle de velocidade).

O que essas cargas tem em comum é que dependem de uma fonte da alimentação, responsável por adequar a energia suprida pela rede CA (50 ou 60Hz), na forma monofásica, bifásica ou trifásica, em CC para alimentar os componentes das cargas eletrônicas dedicadas (SED).

3.2 Características Básicas de Operação de Equipamentos Eletrônicos Alimentados por Fontes CC Monofásicas.

Em equipamentos eletrônicos monofásicos existem basicamente dois tipos mais usuais de fontes de alimentação: as com reguladores lineares e as com reguladores chaveados. Para o entendimento do impacto que elevações e afundamentos de tensão da rede causam sobre as cargas sensíveis, torna-se importante conhecer o modo de operação dessas fontes de alimentação e saber como esta interage com a parte sensível, o SED (Figura 3.1).

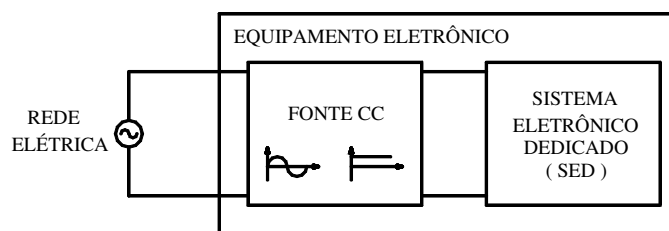


Figura 3.1 – Fonte CC Alimentando Carga Sensível.

Na Figura 3.2 tem-se a configuração mais detalhada de uma fonte de alimentação: transformador de entrada, estágio de retificação, filtro capacitivo e o regulador de tensão (linear ou chaveado) que alimenta o SED. Importante salientar que existem diferentes topologias para as fontes CC, sendo que algumas não apresentam o transformador de entrada, diferentes tipos de

reguladores de tensão, mas basicamente pode-se encontrar sempre os estágios mostrados na Figura 3.2.

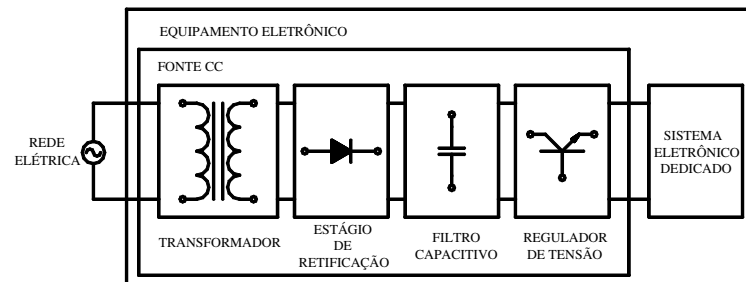


Figura 3.2 — Estrutura Típica do Fonte CC Detalhada.

3.3 Tipos de Cargas Alimentadas pelo Conversor CA-CC com Filtro Capacitivo

A sensibilidade das cargas frente a elevações e afundamentos de tensão está intrinsecamente relacionada com os armazenadores de energia (capacitores/indutores) da fonte CC e com a forma como essa energia é convertida pelo SED (carga eletrônica emulando impedância constante, corrente constante ou potência constante). A Figura 3.3 ilustra os três tipos de cargas que serão consideradas.

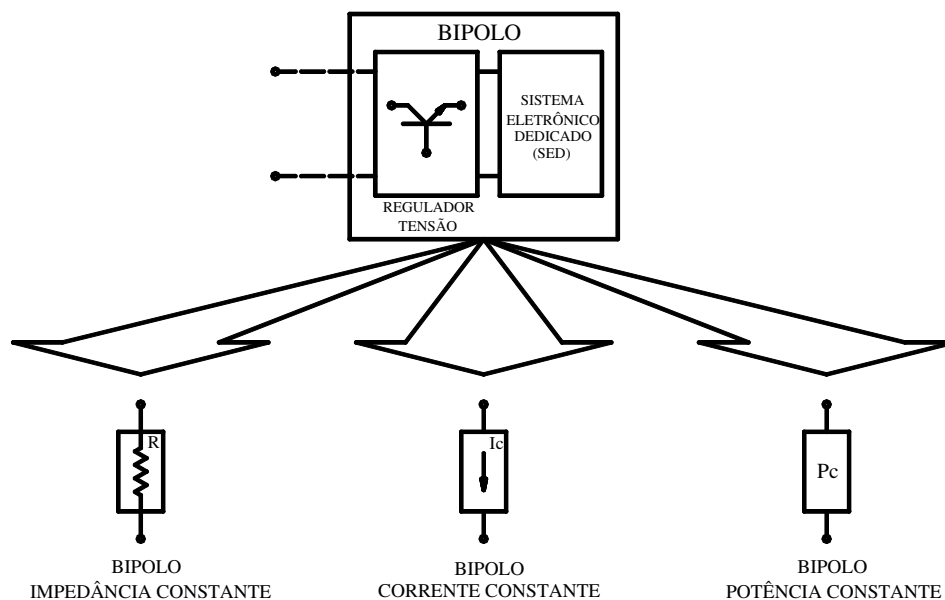


Figura 3.3 - Tipos de Cargas Alimentadas pelo Conjunto Conversor CA-CC com Filtro Capacitivo.

3.4 Representação de Fonte CC Monofásica com Transformador na Entrada.

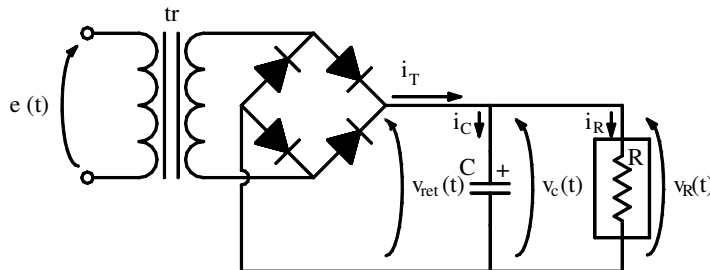


Figura 3.4 – Fonte CC Monofásica Alimentando SED tipo Impedância Constante.

Para estudar o comportamento desse sistema frente a variações da tensão de entrada, utilizaram-se os modelos dos componentes da fonte mostradas na Figura 3.5. Do ponto de vista do SED, as variações da tensão percebidas dependem da dinâmica dos processos de carga e descarga do capacitor de saída do conversor CA-CC.

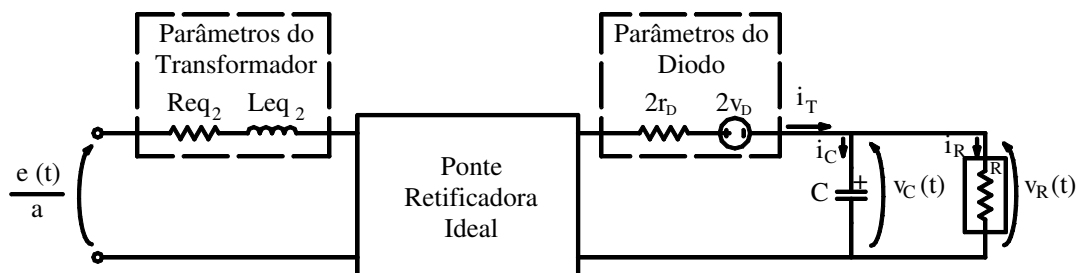


Figura 3.5 - Modelo da Fonte CC Alimentando SED tipo Impedância Constante.

As grandezas utilizadas na Figura 3.5 são definidas da seguinte forma:

- $e(t)$ tensão CA de entrada
- a relação de transformação
- R_{eq2} resistência série do transformador, referida ao secundário
- X_{eq2} reatância série (dispersão) referida ao secundário
- r_D resistência de condução do diodo
- v_D tensão de condução direta do diodo
- C capacitância de saída do conversor CA-CC
- R resistência representando o SED tipo impedância constante

O modelo pode ser simplificado substituindo-se a ponte retificadora ideal por uma chave ideal e aplicado-se o módulo da tensão diretamente na tensão de entrada, conforme Figura 3.6.

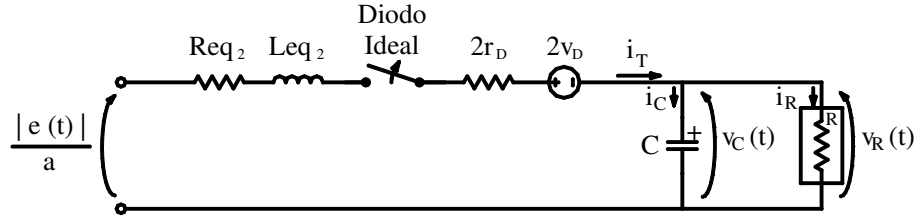


Figura 3.6 - Modelo da Fonte CC Alimentando um SED tipo Impedância Constante.

A menos do bipolo SED (impedância constante), o modelo da Figura 3.6 será o mesmo utilizado mais adiante para estudo do comportamento de carga e descarga do filtro capacitivo para os outros casos, ou seja SED de corrente constante e potência constante.

3.4.1 Curva de Carga do Capacitor para SED de Impedância Constante

Como existe uma não-linearidade do circuito, dada pelo diodo ideal (chave) do modelo, torna-se necessário considerar dois estados de operação: 1) diodo em condução, diretamente polarizado, caracterizando o processo de carga do filtro capacitivo e 2) diodo aberto, reversamente polarizado, caracterizando a descarga do capacitor sobre o SED. A Figura 3.7 representa o estado do diodo em condução e a configuração mostrada é para modelagem do filtro capacitivo durante o processo de carga do capacitor armazenador de energia.

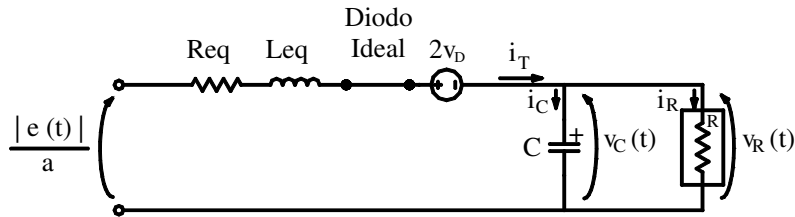


Figura 3.7 - Modelo para Carga do Filtro Capacitivo com SED de Impedância Constante.

Comparando as Figura 3.6 e Figura 3.7 verifica-se que Req representa a soma das resistências do transformador com a dos dois diodos em condução e Leq a indutância de dispersão do transformador, ou seja:

$$Req = Req_2 + 2r_D = \frac{R_1}{a^2} + R_2 + 2r_D \quad (3.1)$$

$$Leq = \frac{Xeq_2}{2\pi f} = \left(\frac{X_1}{a^2} + X_2 \right) \frac{1}{2\pi f} = Leq_2 \quad (3.2)$$

Assim pode-se descrever o comportamento do circuito da Figura 3.7 através de duas equações de estado, que podem ser obtidas considerando-se as equações de Kirchhoff: de malha para as tensões e dos nós para as correntes:

$$\frac{|e(t)|}{a} = v_{Req}(t) + v_{Leq}(t) + 2v_D + v_C(t) \quad (3.3)$$

ou ainda:

$$\frac{|e(t)|}{a} = Req \cdot i_T(t) + Leq \frac{di_T}{dt} + 2v_D + v_C(t) \quad (3.4)$$

Portanto, a primeira equação de estado descreve o comportamento do circuito considerando-se a condição de carga do capacitor do filtro capacitivo:

$$Leq \frac{di_T}{dt} = \frac{|e(t)|}{a} - Req \cdot i_T(t) - 2v_D - v_C(t) \quad (3.5)$$

A equação das correntes é dada por:

$$i_T(t) = i_R(t) + i_C(t) \quad (3.6)$$

ou:

$$i_T(t) = \frac{v_C(t)}{R} + C \frac{dv_C}{dt} \quad (3.7)$$

Portanto, a segunda equação de estado é dada por:

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_T(t) - \frac{v_C(t)}{R} \quad (3.8)$$

A partir das equações (3.5) e (3.8) obtém-se por integração numérica a resposta do filtro capacitivo para entradas e condições iniciais $i_T(0)$ e $v_C(0)$ conhecidas.

Importante observar que as equações mostradas são aplicáveis a qualquer tipo de tensão de entrada $e(t)$: senoidal pura, com harmônicas ou mesmo sinais aperiódicos e com composição harmônica e inter-harmônica aleatória. Porém não é aplicável a sinais que contenham nível CC, isto pelo modelo simplificado do transformador utilizado.

Para exemplificar, simulou-se a resposta do filtro capacitivo, assumindo as seguintes condições:

1) Tensão aplicada na entrada em degrau:

$$e(t) = 127,0 \cdot \sqrt{2} \cdot u(t) \text{ V}$$

2) Parâmetros do transformador (índice 1 refere-se ao primário e 2 ao secundário):

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = 127,0V \\ V_2 = 9,5V \end{array} \right\} a = 13,37$$

$$R_1 = 120,0\Omega \quad e \quad R_2 = 1,6\Omega$$

$$X_1 = 19,13\Omega \quad e \quad X_2 = 0,107\Omega \quad \text{considerando} \quad f = 60\text{ Hz}$$

Com R_1 e R_2 obtém-se Req_2 :

$$Req_2 = \frac{R_1}{a^2} + R_2 = 2,27\Omega$$

De modo similar com X_1 e X_2 obtém-se Xeq_2 :

$$Xeq_2 = \frac{X_1}{a^2} + X_2 = 0,214 \Omega$$

Assim a indutância equivalente no lado do secundário (Leq_2) pode ser obtida conforme equação (3.2):

$$Leq = Leq_2 = \frac{Xeq_2}{2\pi f} = 567,6 \mu H$$

3) Parâmetros do diodo:

$$r_D = 0,5 \Omega$$

$$v_D = 0,7 \text{ V}$$

4) Filtro capacitivo (Capacitor):

$$C = 470,0 \text{ } \mu\text{F}$$

5) Bipolo SED de impedância constante:

$$R = 100,0 \text{ } \Omega$$

Com os parâmetros do circuito e mais as equações (3.5) e (3.8) tem-se as equações que representam um circuito com bipolo SED de impedância constante.

$$Leq \frac{di_T}{dt} = \frac{|e(t)|}{a} - Req \cdot i_T(t) - 2v_D - v_C(t)$$

$$567,6 \cdot 10^{-6} \frac{di_T}{dt} = \frac{|127,0 \cdot \sqrt{2} \cdot u(t)|}{13,37} - 3,27 \cdot i_T(t) - 1,4 - v_C(t) \quad (3.9)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_T(t) - \frac{v_C(t)}{R}$$

$$470 \cdot 10^{-6} \frac{dv_C}{dt} = i_T(t) - \frac{v_C(t)}{100} \quad (3.10)$$

Utilizando, p. ex., o método de integração de Euler para solução das equações (3.9) e (3.10), com condições iniciais nulas $v_C(0)=0$ e $i_T(0)=0$, obtém-se como resposta a um evento tipo degrau de tensão aplicado no instante te , o gráfico da Figura 3.8.

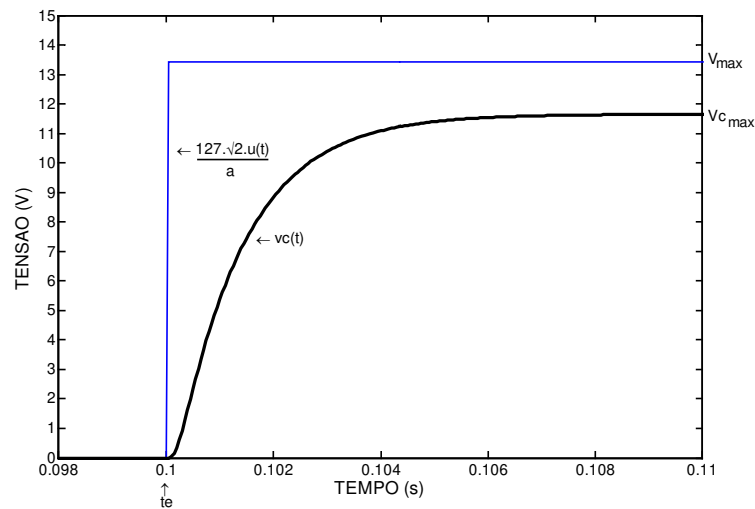


Figura 3.8 - Resposta de Carga do Filtro Capacitivo Alimentando SED tipo Impedância Constante

Uma conclusão imediata é que a carga do filtro capacitivo praticamente segue uma exponencial com pequeno atraso, fato este decorrente da reação da indutância “ L_{eq} ” em conjunto com a resistência interna dos diodos “ $2r_D$ ”. A taxa de carga do capacitor, por sua vez, dependendo da impedância que está sendo suprida.

Esse atraso de resposta, por outro lado, mostra que os transformadores de entrada são capazes de atenuar o efeito de transitórios rápidos, por exemplo, surtos de tensão na rede. No gráfico também é fácil notar que a carga do filtro capacitivo não atinge o valor de pico da tensão de entrada “ $|e(t)/a|$ ” devido, principalmente, à queda de tensão na polarização dos dois diodos do estágio retificador “ $2V_D$ ”. Esta característica é mais perceptível em fontes lineares de tensão já que temos uma relação de transformação “ a ”, onde a tensão secundária é de apenas algumas dezenas de volts, e a tensão de polarização dos diodos pode representar mais de 10% dessa tensão.

3.4.2 Curva de Descarga do Capacitor para SED de Impedância Constante

Para analisar a resposta de descarga do filtro capacitivo basta considerar que a tensão de entrada foi desligada, de modo que os diodos são polarizados reversamente pela tensão do filtro capacitivo. Assumindo-se que a condição inicial agora é a tensão conhecida sobre o capacitor ($V_O \neq 0$), e que a corrente suprida pela rede é nula ($i_T = 0$). Assim, o circuito pode ser simplificado conforme a Figura 3.9.

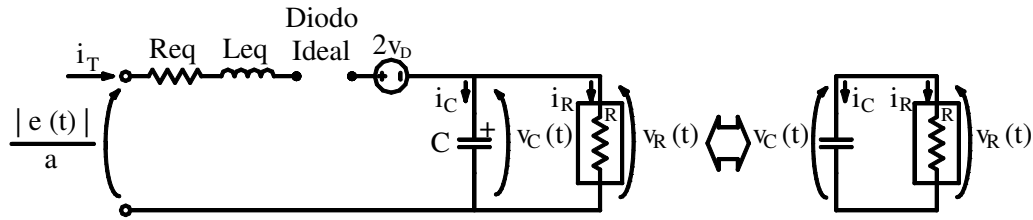


Figura 3.9 - Modelo para Descarga do Filtro Capacitivo para SED de Impedância Constante.

Neste caso, o circuito resume-se a uma associação RC em paralelo, com tensão inicial não nula sobre o capacitor, resultando um decaimento exponencial da tensão do capacitor “C”, de acordo com a equação (3.11).

$$v_C(t) = V_O \cdot e^{-t/RC} \quad (3.11)$$

Para modelagem do circuito de modo a obter as curvas de carga e descarga de forma geral, ou seja, considerando funções arbitrárias na entrada “e(t)”, torna-se conveniente obter tais curvas através de métodos numéricos, como foi feito neste estudo. A resposta (3.11) é derivada da equação de balanço de correntes, resultando a equação de estado (3.12):

$$\begin{aligned} i_C(t) + i_R(t) &= 0 \\ C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C(t)}{R} &= 0 \\ \frac{dv_C}{dt} &= -\frac{v_C(t)}{RC} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Para simular a resposta de descarga do filtro capacitivo foi considerada a seguinte situação “C = 470 μF”, condição inicial “ $V_O = 9,5 \cdot \sqrt{2}$ V” e “R = 100 Ω”. O gráfico da Figura 3.10 mostra a resposta do filtro capacitivo durante a descarga alimentando um SED de impedância constante.

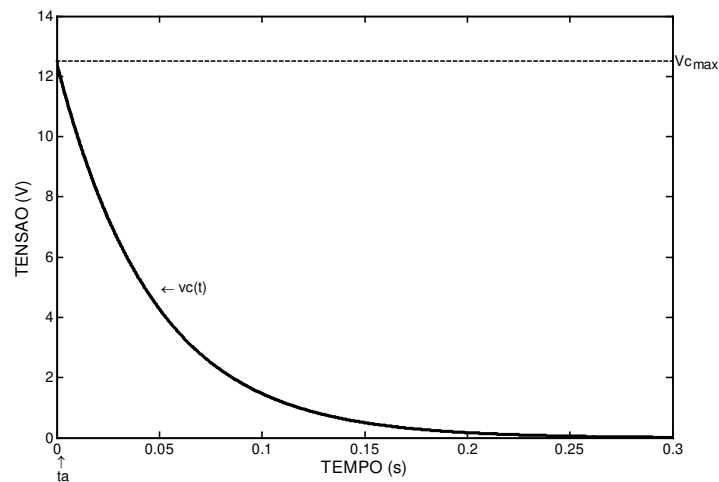


Figura 3.10 - Resposta de Descarga do Filtro Capacitivo para SED tipo Impedância Constante.

Conhecendo-se as curvas de carga e descarga do filtro capacitivo, pode-se compô-las de modo a obter a resposta para o modelo do circuito mostrado na Figura 3.4. Suponhamos que tal circuito esteja conectado à rede elétrica com tensão nominal de 127V, com transformador de entrada como definido ($a=13,37$) e que em um determinado instante “ t_a ” ocorreu um afundamento retangular de tensão de modo que seu valor caiu para 30% do valor nominal durante 6 ciclos, resultando as curvas mostradas na Figura 3.11.

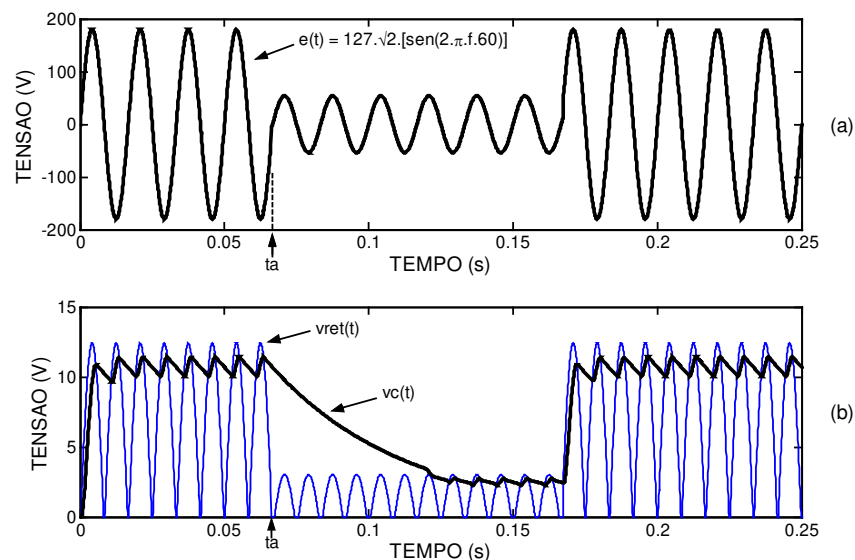


Figura 3.11 - Efeito de Afundamento de Tensão sobre SED de Impedância Constante.

(a) Excitação Senoidal de Entrada $e(t)$ Considerando $V_n = 127 \text{ V}$

(b) Resposta do Filtro Capacitivo $vc(t)$ à Tensão de Excitação com Afundamento de 70%

Os gráficos da Figura 3.11 mostram o comportamento da rede elétrica e a resposta $v_C(t)$, que é observada no filtro capacitivo, e que efetivamente supre a carga do SED. Assim, o afundamento da tensão da rede apresenta um aspecto bastante diferente do percebido pelo SED. As consequências disso serão discutidas mais adiante.

3.5 Comportamento do Filtro Capacitivo com SED de Corrente Constante

Nos próximos itens será analisada a característica de carga e descarga do filtro capacitivo da fonte CC, alimentando inicialmente SED tipo corrente e depois potência constante.

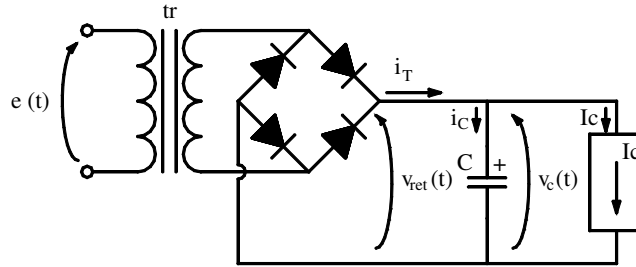


Figura 3.12 - Modelo de Fonte CC Alimentando SED tipo Corrente Constante.

A análise tanto para corrente constante como potência constante será similar à feita para impedância constante.

3.5.1 Curva de Carga do Capacitor para SED de Corrente Constante

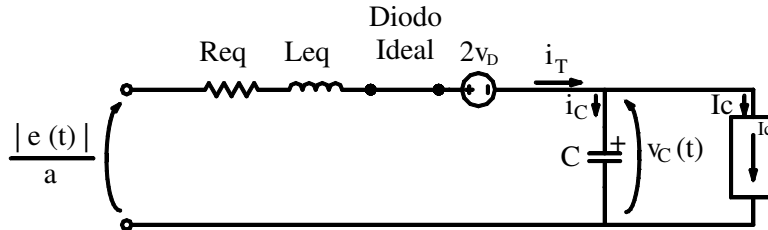


Figura 3.13 - Modelo para Carga do Filtro Capacitivo com SED tipo Corrente Constante.

Baseando-se na Figura 3.13, e fazendo as mesmas considerações utilizadas para análise de carga para impedância constante tem-se a equação (3.13) como a primeira equação de estado que descreve a resposta de carga do filtro capacitivo. Notar que é a mesma utilizada para impedância constante:

$$Leq \frac{di_T}{dt} = \frac{|e(t)|}{a} - Req \cdot i_T(t) - 2v_D - v_c(t) \quad (3.13)$$

A segunda equação de estado é obtida considerando-se a equação de corrente:

$$i_r(t) = I_c + i_c(t) \quad (3.14)$$

Neste caso que I_c é um valor constante, imposto pelo SED de corrente constante. A equação de corrente pode ainda ser escrita como:

$$i_r(t) = I_c + C \frac{dv_c}{dt} \quad (3.15)$$

ou:

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_r(t) - I_c \quad (3.16)$$

A resposta de carga do filtro capacitivo para um bipolo de corrente constante é dada pelas equações (3.13) e (3.16).

Tomando-se o mesmo exemplo utilizado para impedância constante e considerando-se como SED de Corrente Constante " $I_c = 100\text{mA}$ " tem-se as equações (3.17) e (3.18) e a resposta ao degrau de tensão pode ser vista no gráfico da Figura 3.14.

$$567,6 \cdot 10^{-6} \frac{di_r}{dt} = \frac{|127,0 \cdot \sqrt{2} \cdot u(t)|}{13,37} - 3,27 \cdot i_r(t) - 1,4 - v_c(t) \quad (3.17)$$

$$470 \cdot 10^{-6} \frac{dv_c}{dt} = i_r(t) - 0,1 \quad (3.18)$$

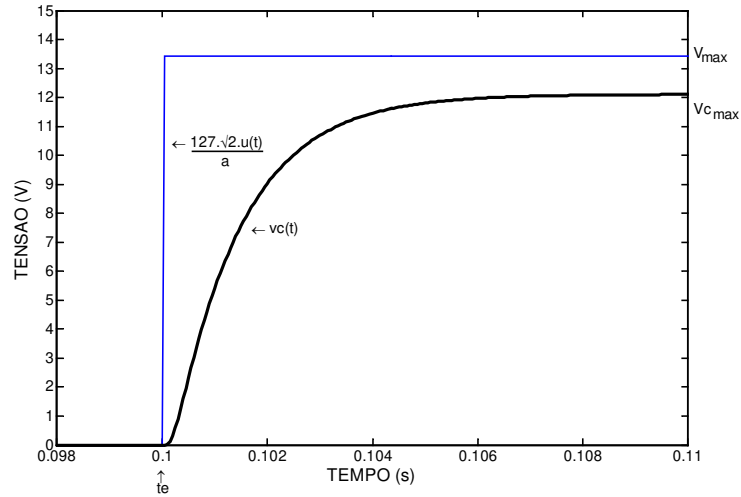


Figura 3.14 - Resposta de Carga do Filtro Capacitivo alimentando SED tipo Corrente Constante.

Notar que essa curva é muito semelhante à obtida para Impedância Constante uma vez que se trata de cargas com valores comparáveis.

3.5.2 Curva de Descarga do Capacitor para SED de Corrente Constante

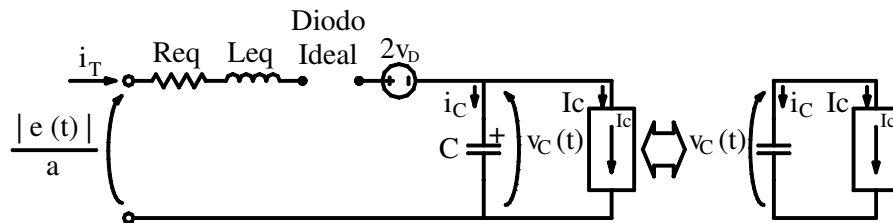


Figura 3.15 - Modelo para Descarga do Filtro Capacitivo para SED de Corrente Constante.

A Figura 3.15 representa o circuito para descarga do filtro capacitivo sob corrente constante. Como na análise para impedância constante, deve-se considerar uma condição inicial para os elementos armazenadores de energia, capacitores, “ $V_O = q_O/C$ ”.

A solução analítica neste caso, corrente constante, deve ser analisada do ponto de vista das cargas elétricas drenadas pelo bipolo SED de corrente constante. Tem-se como condição inicial no filtro capacitivo:

$$q_O = C \cdot V_O \quad (3.19)$$

Como a corrente solicitada pelo SED é constante, e tendo (3.19) como condição inicial, resulta:

$$q(t) = q_0 - I_C \cdot t = C \cdot v_C(t) \quad (3.20)$$

Assim a resposta analítica para o filtro capacitivo quando da aplicação ao SED de corrente constante corresponde a:

$$v_C(t) = V_0 - \frac{I_C \cdot t}{C} \quad (3.21)$$

A equação de estado, que é mais adequada à aplicação de métodos de cálculo numérico é dada pela equação (3.22).

$$i_C(t) + I_C = 0$$

$$C \frac{dv_C}{dt} + I_C = 0$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{I_C}{C} \quad (3.22)$$

A Figura 3.16 apresenta o gráfico da resposta do filtro capacitivo em descarga para o SED de corrente constante supondo que “ $C = 470 \mu\text{F}$ ”, “ $V_0 = 9,5 \cdot \sqrt{2} \text{ V}$ ” e “ $I_C = 100 \text{ mA}$ ”. Observa-se o decaimento linear da tensão $v_C(t)$.

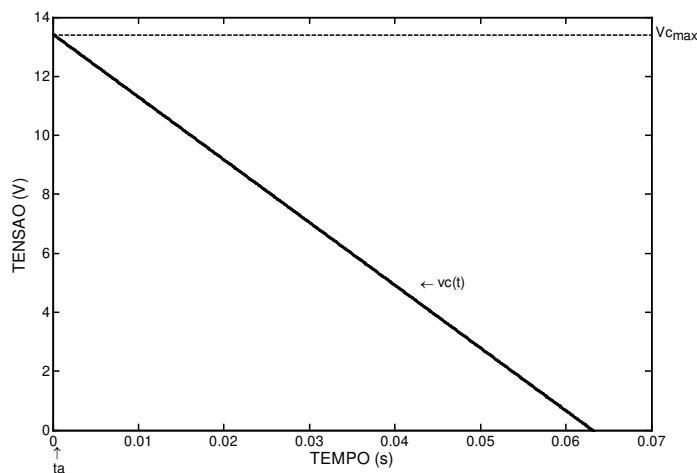


Figura 3.16 - Resposta de Descarga do Filtro Capacitivo para SED tipo Corrente Constante.

Com a curva de carga e descarga do filtro capacitivo para SED de Corrente Constante, compõe-se a resposta do filtro capacitivo para o modelo do circuito, mostrado na Figura 3.12.

Da mesma maneira, que o circuito de Impedância Constante vamos supor que tal circuito está conectado à rede elétrica com tensão nominal de 127 V e que em um determinado instante “ta” ocorreu um afundamento retangular de tensão e que seu valor caiu para 30% do valor nominal da tensão, com duração de 6 ciclos.

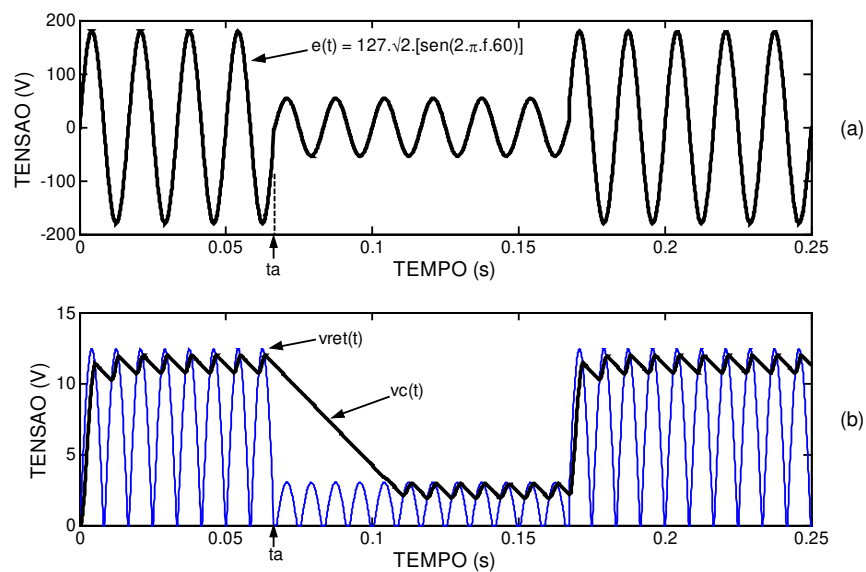


Figura 3.17 - Resposta de Fonte CC Alimentando SED tipo Corrente Constante.

(a) Excitação Senoidal de Entrada $e(t)$ Considerando $V_n = 127$ V

(b) Resposta do Filtro Capacitivo $v_c(t)$ à Tensão de Excitação

Os gráficos da Figura 3.17 apresentam o comportamento da rede elétrica e a resposta $v_c(t)$ com decaimento linear da tensão no filtro capacitivo devido ao SED de corrente constante.

3.6 Comportamento do Filtro Capacitivo com SED de Potência Constante

A Figura 3.18 apresenta o circuito para modelagem em que o bipolo conectado ao filtro capacitivo é de potência constante.

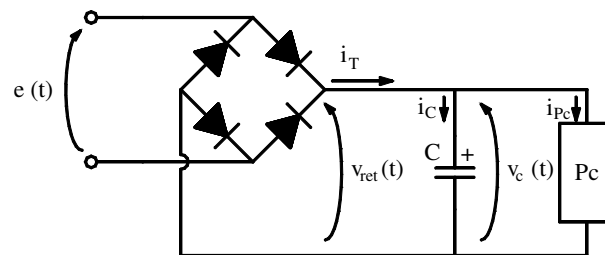


Figura 3.18 - Modelo de Fonte CC alimentando SED tipo Potência Constante.

Observar que neste caso foi eliminado o transformador de entrada, pois o comportamento de potência constante é característico de fontes chaveadas e em sua grande maioria não apresentam o transformador abaixador de tensão, que normalmente é encontrado em fontes lineares de tensão. Nestes casos a maior parte da energia é armazenada no filtro capacitivo, que é quem define a dinâmica de carga e descarga durante as variações da tensão de entrada.

3.6.1 Curva de Carga do Capacitor para SED de Potência Constante

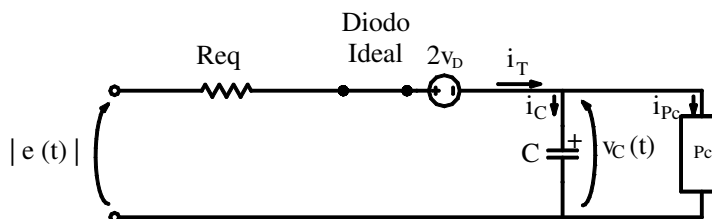


Figura 3.19 - Modelo para Carga do Filtro Capacitivo com SED de Potência Constante.

Na Figura 3.19 pode ser visto o circuito base para estudo da resposta de carga do filtro capacitivo. Sem o transformador monofásico de entrada, não existe mais a indutância “ L_{eq} ” e nem as resistências dos enrolamentos “ R_1 ” e “ R_2 ”.

O valor da resistência equivalente “ R_{eq} ” acaba sendo o próprio valor das resistências internas dos diodos que compõem a ponte retificadora, ou seja, “ $R_{eq} = 2r_D$ ”.

Como o bipolo em questão solicita potência constante, conforme equação (3.23):

$$P_C = v_{Pc}(t) \cdot i_{Pc}(t) \quad (3.23)$$

e, sabendo-se que $v_{Pc}(t) = v_C(t)$ tem-se:

$$P_C = v_C(t) \cdot i_{Pc}(t)$$

Da equação de corrente obtém-se:

$$i_T(t) = i_C(t) + i_{Pc}(t)$$

$$i_T(t) = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{P_C}{v_C(t)}$$

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_T(t) - \frac{P_C}{v_C(t)} \quad (3.24)$$

Da equação de malha de tensão resulta:

$$|e(t)| = 2r_D \cdot i_T(t) + 2v_D + v_C(t)$$

$$i_T(t) = \frac{|e(t)|}{2r_D} - \frac{v_D}{r_D} - \frac{v_C(t)}{2r_D} \quad (3.25)$$

Substituindo a equação (3.25) em (3.24) determina-se a resposta de carga para o filtro capacitivo com bipolo de potência constante, equação (3.26):

$$C \frac{dv_C}{dt} = \frac{|e(t)|}{2r_D} - \frac{v_D}{r_D} - \frac{v_C(t)}{2r_D} - \frac{P_C}{v_C(t)} \quad (3.26)$$

O gráfico da Figura 3.20 apresenta a resposta de carga do filtro capacitivo frente a um degrau de tensão $127\sqrt{2}u(t)$ no instante “ t_e ”. Os parâmetros utilizados são os mesmos para impedância e corrente constante. Deve-se lembrar que neste caso, potência constante, não existe o transformador de entrada, assim “ $R_{eq} = 2r_D$ ” e não temos “ L_{eq} ”. A equação (3.27) representa a resposta vista na Figura 3.20, considerando $P_C = 11,55$ W.

$$470 \cdot 10^{-6} \frac{dv_C}{dt} = \left| 127 \cdot \sqrt{2} \cdot u(t) \right| - 1,4 - \frac{11,55}{v_C(t)} - v_C(t) \quad (3.27)$$

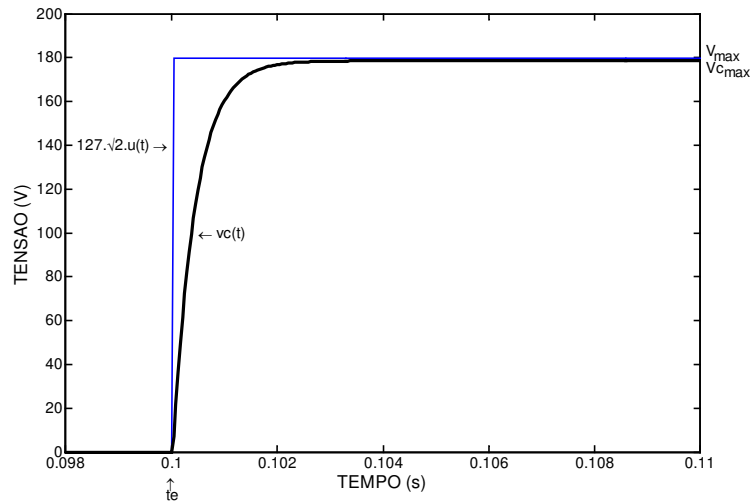


Figura 3.20 - Resposta de Carga do Filtro Capacitivo alimentando SED tipo Potência Constante.

3.6.2 Curva de Descarga do Capacitor para SED de Potência Constante

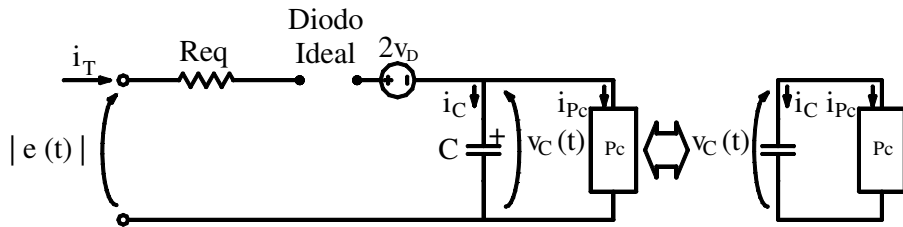


Figura 3.21 - Modelo para Descarga do Filtro Capacitivo para SED de Potência Constante.

O circuito da Figura 3.21 representa o modelo para estudo da resposta de descarga do filtro capacitivo com bipolo de potência constante. A solução analítica baseia-se no consumo da energia do filtro capacitivo a uma taxa constante considerando-se uma condição inicial “ V_0 ”. A taxa de transferência de energia no tempo corresponde à “ P_C ”.

Então, considerando-se um capacitor com energia inicial “ E_O ”, não nula, e sabendo que o bipolo de potência constante solicita energia a uma taxa “ P_C ”, pode-se definir “ E_O ” conforme equação (3.28), para energia inicial:

$$E_o = \frac{1}{2} C \cdot V_o^2 \quad (3.28)$$

Sabendo-se que o SED conectado ao filtro capacitivo solicita potência constante, tem-se como resultado a equação (3.29):

$$E(t) = E_o - P_C \cdot t = \frac{1}{2} C \cdot V_o^2 - P_C \cdot t = \frac{1}{2} C \cdot v_C^2(t) \quad (3.29)$$

A solução analítica para a resposta de descarga $v_C(t)$ do filtro capacitivo pode ser obtida pela equação (3.30) [1]:

$$v_C(t) = \sqrt{V_o^2 - \frac{2 \cdot P_C \cdot t}{C}} \quad (3.30)$$

A resposta na forma de equação de estado pode ser encontrada pela equação de corrente:

$$i_C(t) + i_{P_C} = 0$$

$$C \frac{dv_C}{dt} + \frac{P_C}{v_C(t)} = 0$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{P_C}{C \cdot v_C(t)} \quad (3.31)$$

O gráfico da resposta do filtro capacitivo para descarga com bipolo de potência constante, supondo que “ $C = 470 \mu\text{F}$ ”, “ $V_o = 127.\sqrt{2} \text{ V}$ ” e “ $P_C = 11,55 \text{ W}$ ” é mostrado na Figura 3.22.

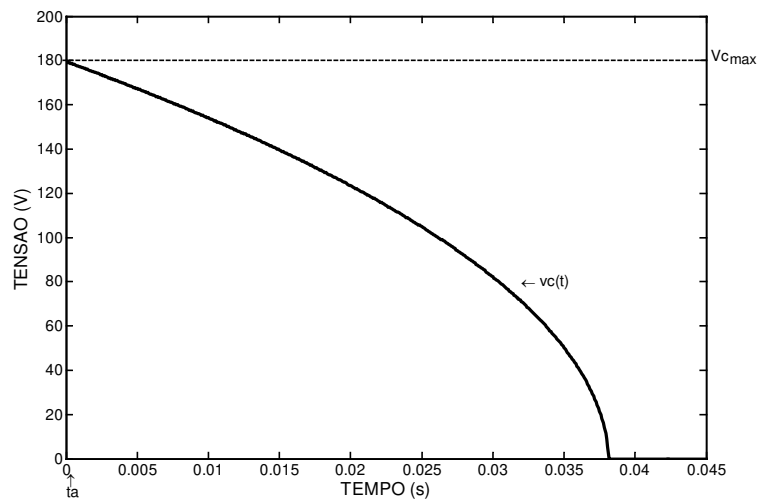


Figura 3.22 - Resposta de Descarga do Filtro Capacitivo Alimentando SED tipo Potência Constante.

Da mesma maneira que os circuitos de impedância constante e corrente constante, vamos supor que o circuito, Figura 3.18, está conectado à rede elétrica com tensão nominal de 127 V e que em um determinado instante “ t_a ” ocorreu um afundamento retangular de tensão cujo valor caiu para 30% da tensão nominal, com duração de 6 ciclos.

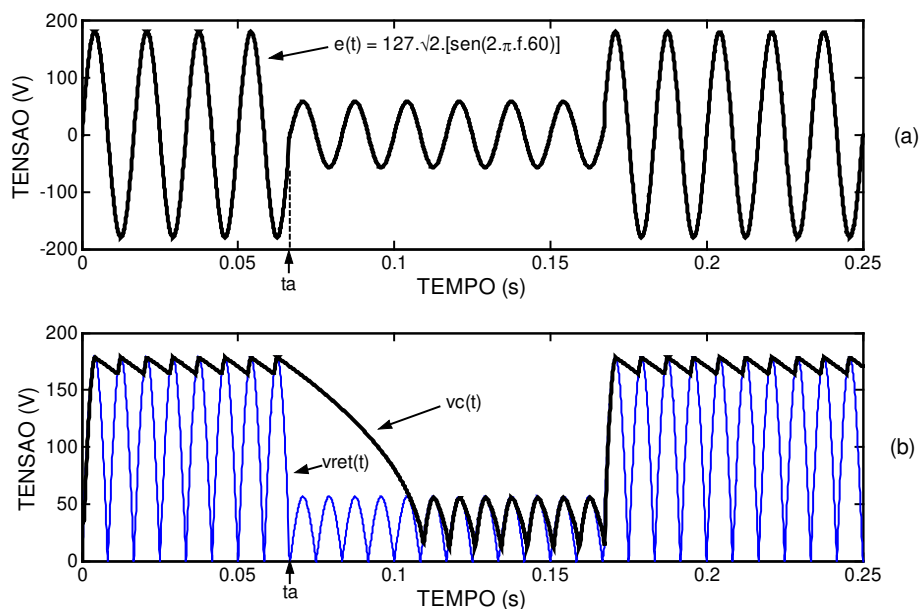


Figura 3.23 - Resposta para SED de Potência Constante.

(a) Excitação Senoidal de Entrada $e(t)$ Considerando $V_n = 127$ V

(b) Resposta do Filtro Capacitivo $v_c(t)$ à Tensão de Excitação

Dos gráficos da Figura 3.23 observa-se o comportamento da rede elétrica e a resposta $v_C(t)$, com decaimento rápido da tensão no filtro capacitivo alimentando um bipolo SED de potência constante.

3.7 Comportamento do Filtro Capacitivo em Fontes Lineares e Fontes Chaveadas

Os modelos apresentados anteriormente para resposta do filtro capacitivo, ou seja, impedância, corrente e potência constante, na prática não ocorrem de forma isolada. Os equipamentos com controle eletrônico podem apresentar essas características de forma combinada. Isso é o que ocorre com as fontes lineares e as chaveadas.

3.7.1 Fonte Linear de Tensão (Regulador Simples)

Em fontes lineares, Figura 3.24, com reguladores simples de tensão, a característica de resposta do filtro capacitivo é a combinação de Impedância Constante com Corrente Constante, isto pode ser observado através de ensaios em laboratório.

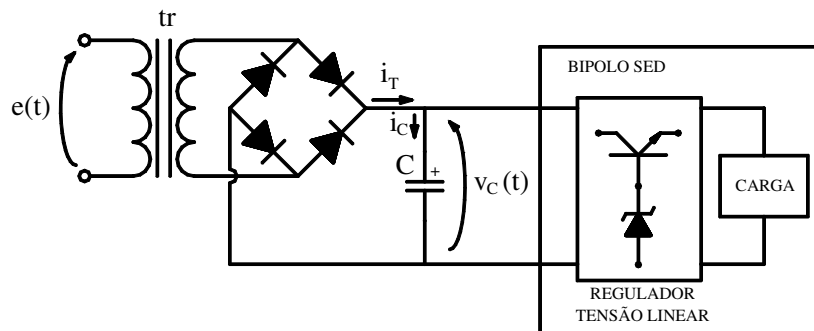


Figura 3.24 - Modelo para Fonte CC Linear.

O comportamento combinado, conforme Figura 3.25, é ilustrado por simulação para dois eventos: uma interrupção momentânea de tensão com duração de 9 ciclos e uma elevação de tensão de 30% da tensão nominal e duração de 1 ciclo. Estes eventos mostram a resposta do filtro capacitivo evidenciando as curvas de corrente e impedância constante. O ponto onde ocorre a transição entre as duas curvas é denominado de Ponto de Desligamento (PD).

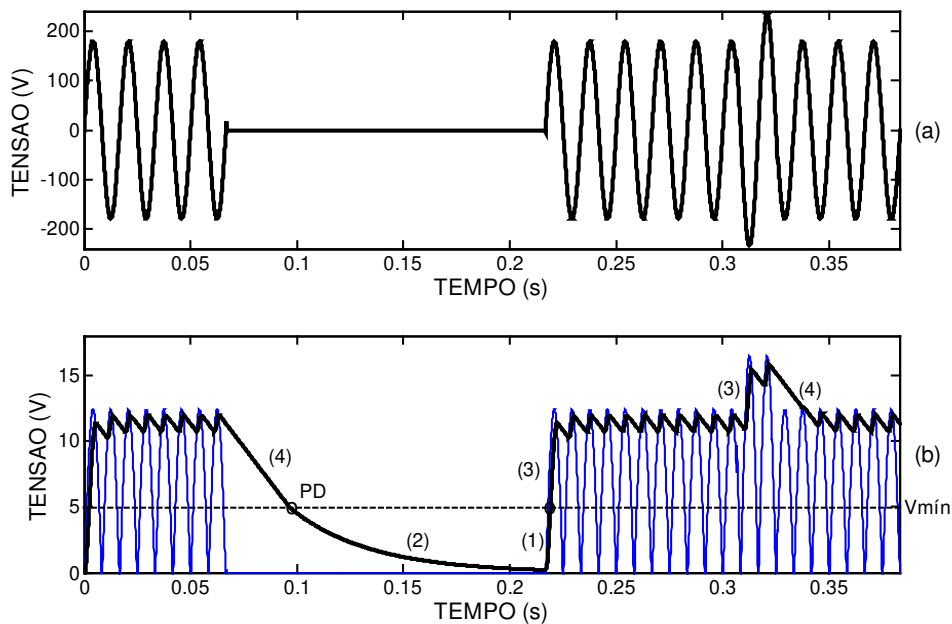


Figura 3.25 - Resposta Filtro Capacitivo para Fonte Linear.

(a) $V_n = 127$ V – Tensão da Rede com Dois Eventos

(b) Resposta do Filtro Capacitivo $v_c(t)$ à Tensão da Rede

Tal comportamento pode ser explicado da seguinte maneira: no trecho em que é observado o decaimento em corrente constante ocorre a operação plena do regulador de tensão, ou seja, os elementos semicondutores estão polarizados em seu ponto de operação e este modo de funcionamento dos reguladores exige uma corrente constante sobre o filtro capacitivo conectado a ele.

Quando a tensão do filtro capacitivo da fonte cai abaixo de um limite mínimo de operação $V_{mín}$, a fonte muda de comportamento e a curva passa a se comportar como impedância constante, pois os componentes semicondutores do regulador de tensão não estão polarizados, ou seja, não existe tensão mínima que garanta a operação do regulador de tensão, ocorrendo o colapso da carga. A característica de decaimento exponencial da tensão no filtro capacitivo é devida somente aos componentes passivos consumirem a energia do filtro capacitivo, comportando-se como um resistor equivalente. Quando a tensão do capacitor chega a $V_{mín}$, fica definido o instante que a fonte deixa de ser regulada, e que define o ponto de desligamento “PD” da carga sensível. O ponto de desligamento será discutido mais detalhadamente no Capítulo 4.

Pela Figura 3.25 pode-se verificar que temos quatro regiões distintas, numeradas de 1 a 4, que caracterizam a tensão em um filtro capacitivo para fontes lineares de tensão, a saber:

Carga (1) e Descarga (2) segundo impedância constante se $v_c < V_{mín}$.

Carga (3) e Descarga (4) segundo corrente constante se $v_c > V_{mín}$.

Nos casos de carga (1) e (3), a magnitude da tensão de entrada deve ser maior que v_C e nos caso de descarga (2) e (4), a magnitude da tensão de entrada deve ser menor que v_C .

A resposta do filtro capacitivo obtida na Figura 3.25 teve como parâmetros:

$V_1 = 127 \text{ V}$	$Leq = 567,6 \mu H$
$V_1 = 9,5 \text{ V}$	$r_D = 0,5 \Omega$
$a = 13,37$	$v_D = 0,7 \text{ V}$
$V_{\min} = 5 \text{ V}$	$C = 470 \mu F$
$R_1 = 120 \Omega$	$R = 80 \Omega$
$R_2 = 1,6 \Omega$	$I_C = 100 \text{ mA}$

As equações que descrevem o circuito da fonte CC com regulador linear de tensão e utilizadas na simulação, são as seguintes:

1) Carga para Impedância Constante:

$$567,6 \cdot 10^{-6} \frac{di_r}{dt} = \frac{|e(t)|}{13,37} - 3,27 \cdot i_r(t) - 1,4 - v_C(t)$$

$$470 \cdot 10^{-6} \frac{dv_C}{dt} = i_r(t) - \frac{v_C(t)}{100}$$

2) Descarga para Impedância Constante:

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C(t)}{37,6 \cdot 10^{-3}}$$

3) Carga para Corrente Constante:

$$567,6 \cdot 10^{-6} \frac{di_r}{dt} = \frac{|e(t)|}{13,37} - 3,27 \cdot i_r(t) - 1,4 - v_C(t)$$

$$470 \cdot 10^{-6} \frac{dv_C}{dt} = i_r(t) - 0,1$$

4) Descarga para Corrente Constante:

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{0,1}{470 \cdot 10^{-6}}$$

3.7.2 Fonte Chaveada

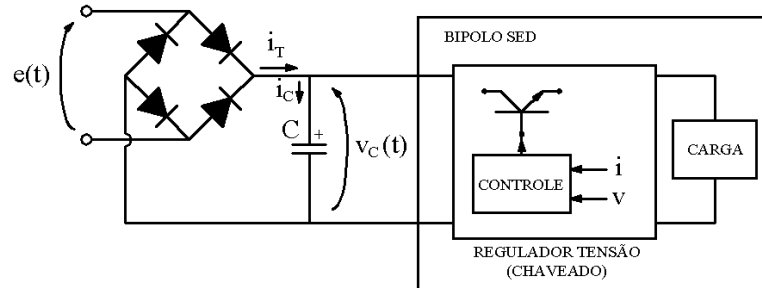


Figura 3.26 - Modelo para Fontes CC Chaveadas.

Através de análise similar à da fonte linear de tensão, verifica-se por ensaios que uma fonte chaveada, Figura 3.26, opera segundo os três modos: impedância, corrente e potência constante.

Para ilustrar, simulou-se na Figura 3.27, uma interrupção de 9 ciclos e uma elevação de 30% da tensão nominal de magnitude com 1 ciclo de duração.

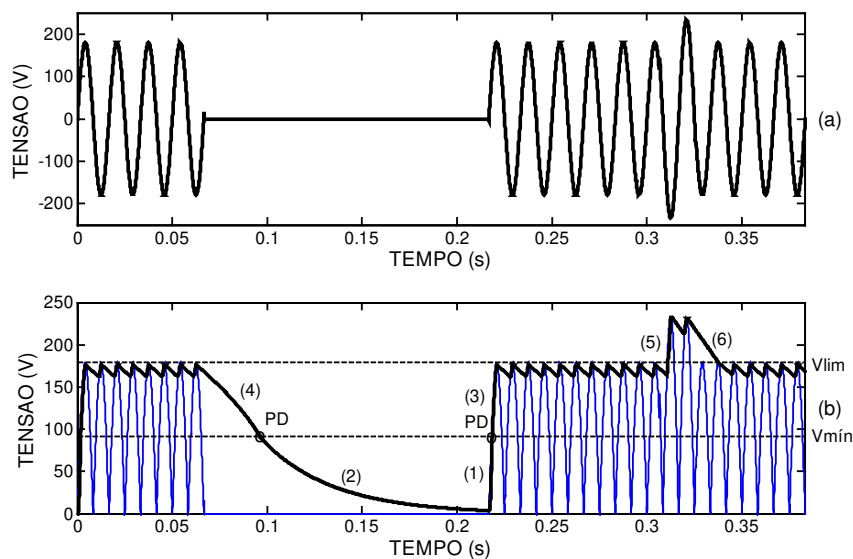


Figura 3.27 - Resposta para uma Fonte Chaveada.

(a) $V_n = 127 \text{ V}$ – Tensão da Rede com Dois Eventos

(b) Resposta do Filtro Capacitivo $v_C(t)$ à Tensão da Rede

A resposta do filtro capacitivo, no caso da interrupção da tensão de entrada, apresenta inicialmente a característica de decaimento de tensão sob potência constante e abaixo do valor mínimo de tensão $V_{\min}$ o comportamento muda para impedância constante. O decaimento em

potência constante ocorre devido à atuação do conversor CC-CC que é capaz de atuar para tensões superiores à tensão $V_{mín}$. Assim, quando a tensão do capacitor chega a V_{min} fica definido o instante de desligamento “PD” da carga alimentada pela fonte chaveada.

O decaimento da tensão em impedância constante neste tipo de fonte, a chaveada, ocorre pelos mesmos motivos apresentados para o caso de fontes lineares: a influência dos elementos passivos do circuito, como os resistores, e o controle da fonte chaveada que não atua por não existir condição mínima para sua operação. Como nas fontes lineares de tensão, essa característica ocorre para tensões inferiores à tensão $V_{mín}$ no filtro capacitivo, a partir do ponto de desligamento “PD”.

Então, as fontes com regulador chaveado de tensão apresentam 6 regiões distintas de operação numeradas de 1 a 6 na Figura 3.27:

Carga (1) e Descarga (2) como impedância constante se $v_C < V_{min}$;

Carga (3) e Descarga (4) como potência constante se $V_{min} < v_C < V_{lim}$;

Carga (5) e Descarga (6) como corrente constante se $v_C > V_{lim}$;

Para ocorrer a carga do capacitor é necessário que a magnitude da tensão de entrada seja maior que v_C e, nos casos de descarga, menor que v_C .

A resposta do filtro capacitivo, Figura 3.27, utilizou como parâmetros:

$$\begin{array}{ll} r_D = 0,5 \, \Omega & P_C = 160 \, W \\ v_D = 0,7 \, V & I_C = 1,5 \, A \\ C = 470 \, \mu F & V_{mín} = 89 \, V \\ R = 80 \, \Omega & \end{array}$$

As equações utilizadas para obter as curvas da Figura 3.27, com os parâmetros citados, são as seguintes:

(1) Carga para Impedância Constante:

$$\begin{aligned} \frac{dv_C}{dt} &= \frac{|e(t)|}{2r_D \cdot C} - \left(\frac{1}{2r_D \cdot C} + \frac{1}{R \cdot C} \right) v_C(t) - \frac{v_D}{r_D \cdot C} \\ \frac{dv_C}{dt} &= \frac{|e(t)|}{470 \cdot 10^{-6}} - \left(\frac{1}{470 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{37,6 \cdot 10^{-3}} \right) v_C(t) - \frac{0,7}{235 \cdot 10^{-6}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

(2) Descarga para Impedância Constante:

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C(t)}{37,6 \cdot 10^{-3}}$$

(3) Carga para Potência Constante:

$$470 \cdot 10^{-6} \frac{dv_C}{dt} = |e(t)| - 1,4 - \frac{160}{v_C(t)}$$

(4) Descarga para Potência Constante:

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{P_C}{470 \cdot 10^{-6} \cdot v_C(t)}$$

No caso de elevações de tensão, acima de V_{lim} , aplicam-se as seguintes equações:

(5) Carga para Corrente Constante:

$$\begin{aligned} \frac{dv_C}{dt} &= \frac{|e(t)|}{2r_D \cdot C} - \frac{I_C}{C} - \frac{v_D}{r_D \cdot C} - \frac{v_C(t)}{2r_D \cdot C} \\ \frac{dv_C}{dt} &= \frac{|e(t)|}{470 \cdot 10^{-6}} - \frac{1,5}{470 \cdot 10^{-6}} - \frac{0,5}{235 \cdot 10^{-6}} - \frac{v_C(t)}{470 \cdot 10^{-6}} \end{aligned} \quad (3.33)$$

(6) Descarga para Corrente Constante:

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{1,5}{470 \cdot 10^{-6}}$$

3.8 Conversor CA-CC Trifásico

De modo similar ao conversor CA-CC monofásico, é possível modelar o conversor trifásico, mostrado na Figura 3.28. Na ponte retificadora trifásica, como na monofásica, existem sempre dois diodos conduzindo, enquanto os outros quatro diodos não operam e este modo de funcionamento se alterna ciclicamente (a cada 60°) entre os seis diodos existentes.

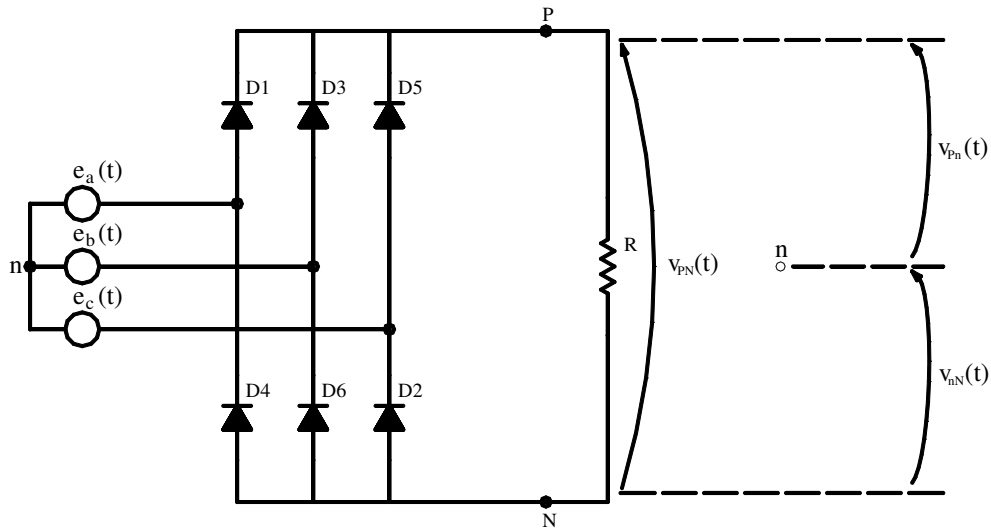


Figura 3.28 – Ponte Retificadora Trifásica a Diodos. [4]

A Figura 3.29 mostra a resposta “ $V_{PN}(t)$ ” do retificador trifásico para uma carga resistiva quando alimentado com tensões de entrada “ $e_a(t)$ ”, “ $e_b(t)$ ” e “ $e_c(t)$ ” senoidais e equilibradas.

O gráfico (a), representa as tensões de entrada e no gráfico (b) observamos as tensões envoltórias “ $V_{Pn}(t)$ ” e “ $V_{nN}(t)$ ”. Da soma dessas duas envoltórias após a inversão de “ $V_{nN}(t)$ ”, resulta a tensão de saída “ $V_{PN}(t)$ ”, que pode ser observada no gráfico (c).

Ainda, observando-se o gráfico (b), podemos perceber quais pares de diodos entram em condução conforme a evolução das tensões “ $e_a(t)$ ”, “ $e_b(t)$ ” e “ $e_c(t)$ ”, por exemplo: observando-se o primeiro lóbulo da envoltória “ $V_{Pn}(t)$ ”, a montante do pico de tensão da mesma a diferença de potencial é maior entre a tensão “ $e_a(t)$ ” e “ $e_b(t)$ ” o que determina a condução entre os diodos “D1” e “D6”.

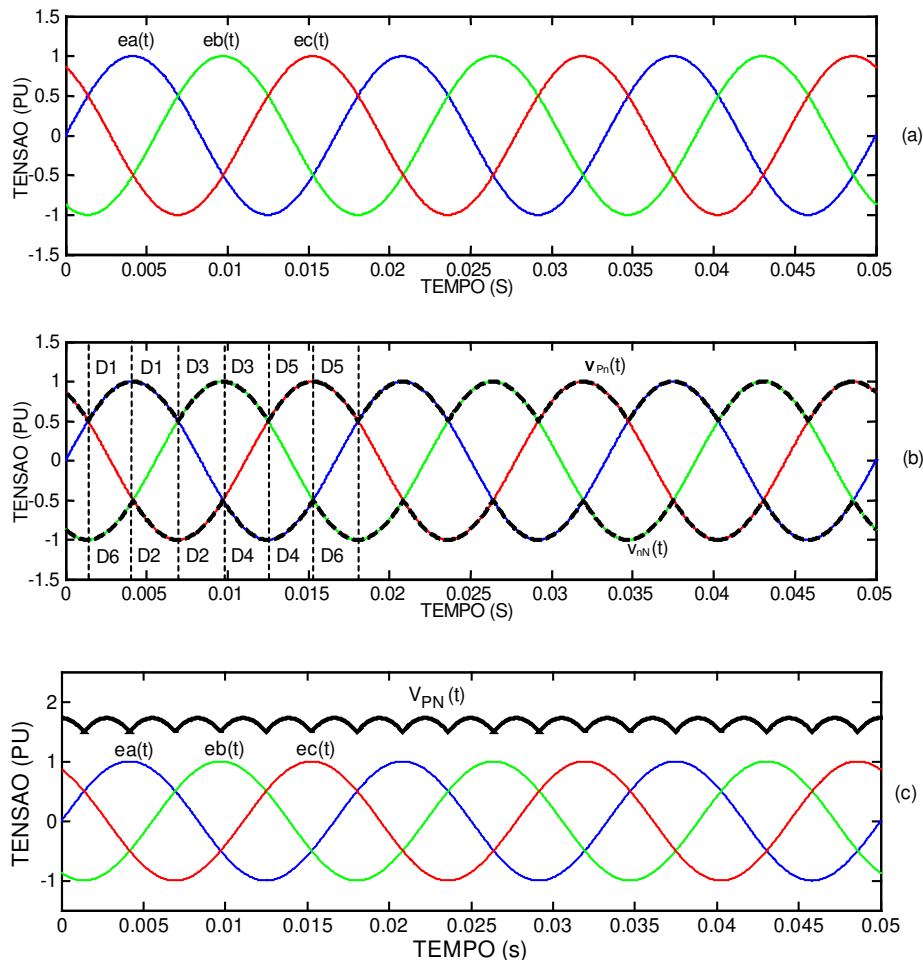


Figura 3.29 -(a) Tensões Aplicadas nas Entradas $e_a(t)$, $e_b(t)$ e $e_c(t)$,
 (b) Tensão Envolvente $V_{Pn}(t)$ e $V_{nN}(t)$ e Pares de Diodo em Condução,
 (c) Tensão de Saída, Retificada $V_{PN}(t)$

Quando a tensão “ $e_a(t)$ ” atinge seu ponto máximo a diferença para a tensão “ $e_c(t)$ ” fica maior do que para “ $e_b(t)$ ”, ocorrendo a comutação entre “D6” (que desliga) e “D2” (que liga). A cada 60° esse ciclo de operação se alterna entre os seis diodos existentes na ponte retificadora trifásica.

3.8.1 Modelo do Conversor CA-CC Trifásico

Baseado no modo de operação da ponte retificadora trifásica, como apenas dois diodos estão conduzindo por vez, os parâmetros serão os similares aos utilizados para a ponte retificadora monofásica, e o modelo pode ser visto nas Figura 3.30 e Figura 3.31. Na Figura 3.30 é mostrada a ponte retificadora ideal mais os parâmetros, considerando-se dois diodos

conduzindo. Ao contrário do modelo do retificador monofásico, onde é possível substituir a ponte retificadora ideal por uma função matemática simples (módulo da tensão de entrada), na ponte retificadora trifásica ideal isto não é possível. Neste caso torna-se necessário desenvolver um algoritmo que simule o comportamento da mesma, que pode ser visto na Figura 3.31.

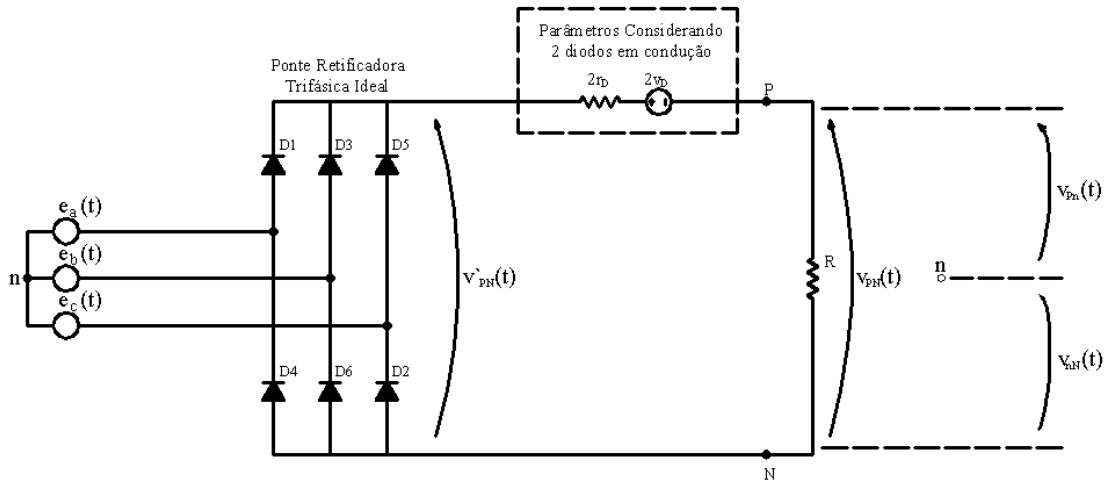


Figura 3.30 - Modelo para o Estágio de Retificação Trifásica.

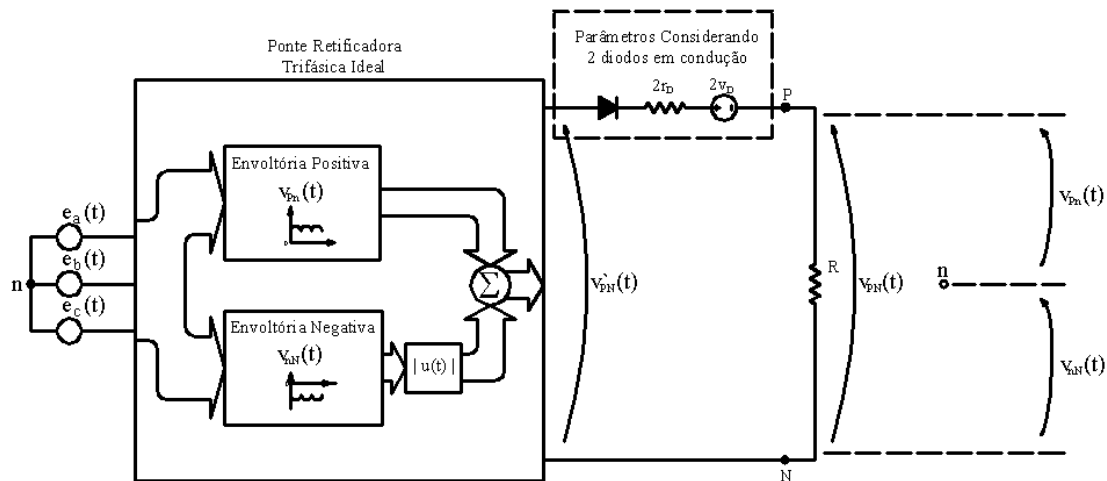
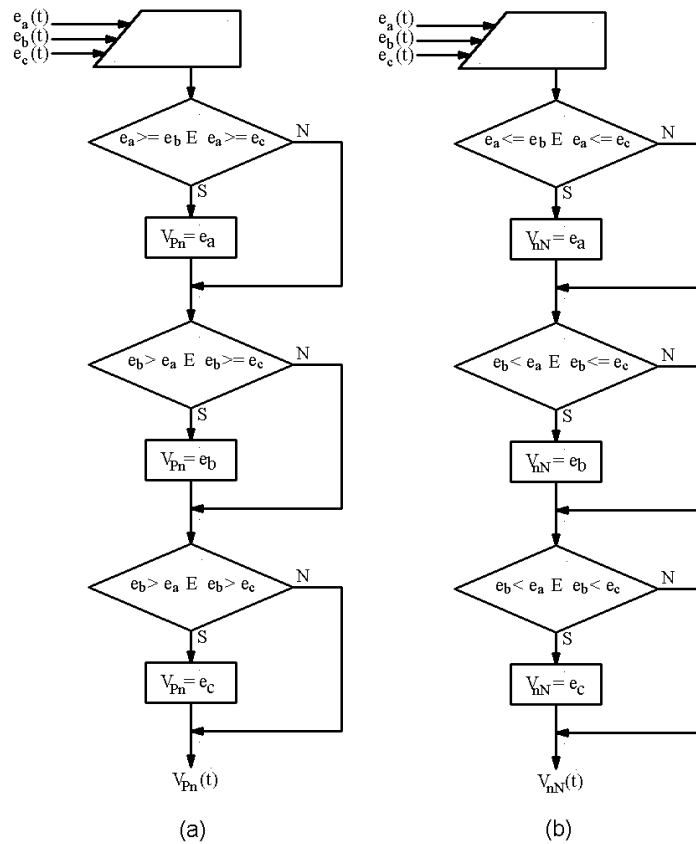


Figura 3.31 - Algoritmo para o Modelo de Retificador Trifásico Ideal.

Dadas as três tensões de entrada “ $e_a(t)$ ”, “ $e_b(t)$ ” e “ $e_c(t)$ ” quaisquer, a ponte retificadora ideal pode ser representada por um algoritmo que obtém:

Composição da envoltória positiva: o bloco em questão tem a finalidade de compor das três tensões de entrada no tempo, de modo a sempre verificar o maior valor comparativamente baseando-se em uma mesma referência, disto resulta como consequência “ $V_{Pn}(t)$ ”, Figura 3.32(a).

Composição da envoltória negativa: de modo similar ao bloco que obtém a envoltória positiva, o bloco para composição da envoltória negativa tem a finalidade de compor das três tensões de entrada no tempo, de modo a sempre verificar o menor valor comparativamente baseando-se em uma mesma referência, disto resulta como consequência “ $V_{nN}(t)$ ”, Figura 3.32(b).



**Figura 3.32 - (a) Algoritmo para Obtenção da Envoltória Positiva $V_{Pn}(t)$
(b) Algoritmo para Obtenção da Envoltória Negativa $V_{nN}(t)$**

Com as duas funções temporais para as envoltórias positiva e a negativa, é possível obter a tensão que representa a forma de onda de tensão de saída do retificador trifásico ideal, da seguinte maneira: aplica-se a função módulo na tensão envoltória negativa “ $|V_{nN}(t)|$ ” e adiciona-se a envoltória positiva, resultando a saída do retificador trifásico ideal “ $V'_{PN}(t)$ ”, equação (3.34).

$$V'_{PN}(t) = V_{Pn}(t) + |V_{nN}(t)| \quad (3.34)$$

Aplicando-se essa tensão a uma carga resistiva e considerando os parâmetros dos dois diodos em condução, tem-se a corrente na carga e sua tensão de saída “ $V_{PN}(t)$ ” conforme equações (3.35) e (3.36).

$$i(t) = \frac{V'_{PN}(t) - 2V_D}{R + 2r_D} = \frac{V_{Pn}(t) + |V_{nN}(t)| - 2V_D}{R + 2r_D} \quad (3.35)$$

$$V_{PN}(t) = R \cdot i(t) = R \frac{V'_{PN}(t) - 2V_D}{R + 2r_D} = R \frac{V_{Pn}(t) + |V_{nN}(t)| - 2V_D}{R + 2r_D} \quad (3.36)$$

3.8.2 Simulação de Fonte CC Chaveada com Conversor CA-CC Trifásico.

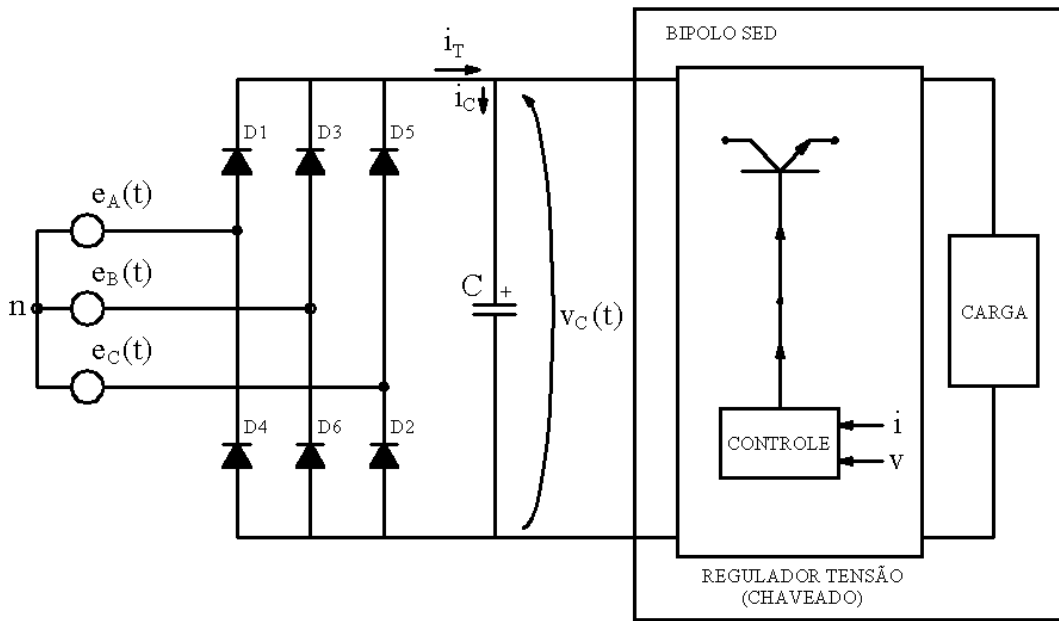


Figura 3.33 - Modelo para Fonte CC Chaveada Trifásica.

A resposta do filtro capacitivo da fonte CC Trifásica obedece às mesmas equações do monofásico, a menos de pequenas considerações:

Na equação (3.26), no lugar do termo:

$$|e(t)| \quad (\text{tensão de entrada pelo retificador monofásico})$$

deve ser colocado o termo referido à tensão trifásica de entrada “ $e_a(t)$ ”, “ $e_b(t)$ ” e “ $e_c(t)$ ” aplicados ao retificador trifásico:

$$V'_{PN}(t) = V_{Pn}(t) + |V_{nN}(t)| \quad (\text{tensão de entrada pelo retificador trifásico})$$

Assim a equação de resposta do filtro capacitivo para a situação de carga tipo potência constante, equação (3.26) ficaria da seguinte forma:

$$C \frac{dv_C}{dt} = \frac{V_{Pn}(t) + |V_{nN}(t)|}{2r_D} - \frac{v_D}{r_D} - \frac{P_C}{v_C(t)} = \frac{V'_{PN}(t)}{2r_D} - \frac{v_D}{r_D} - \frac{P_C}{v_C(t)} \quad (3.37)$$

A resposta do filtro capacitivo para a situação de descarga obedece à equação (3.31) e a análise de resposta para elevações e afundamentos de tensão é o mesmo do caso de fontes chaveadas monofásicas. A Figura 3.34 mostra a resposta a 3 eventos impostos:

- Afundamento de tensão na Fase A “FA”, duração de 3 ciclos e magnitude de 20% da tensão nominal;
- Interrupção nas 3 fases “FA”, “FB” e “FC” com duração de 5 ciclos;
- Elevação de tensão na Fase C “FC”, duração de 1 ciclo e magnitude de 50% da tensão nominal.

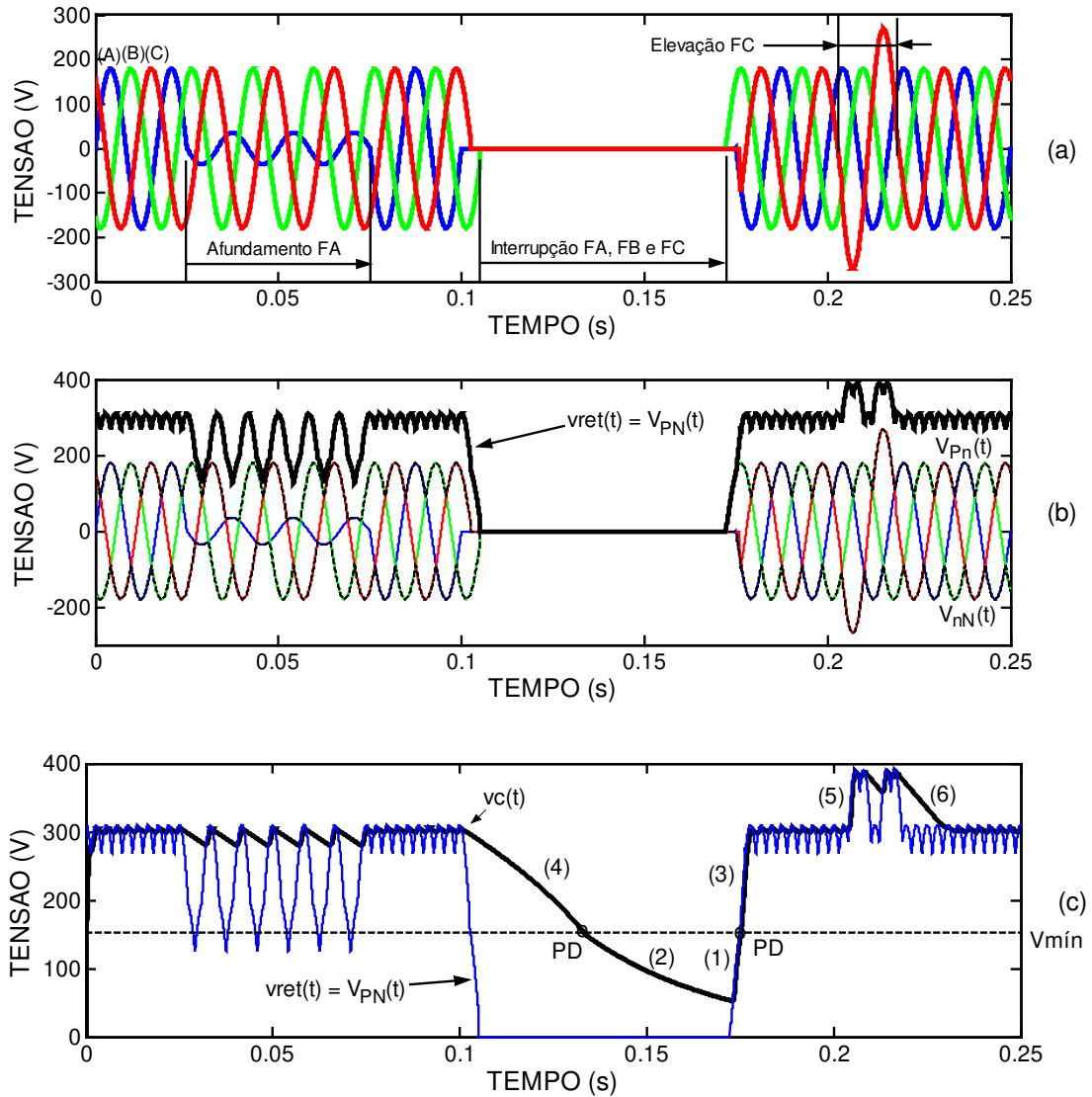


Figura 3.34 - Resposta da Fonte-CC Trifásica Chaveada.

(a) $V_n = 127$ V – $e_a(t)$, $e_b(t)$ e $e_c(t)$ com Três Eventos

(b) Resposta do Estágio de Retificação à Tensão da Rede

(c) Resposta do Filtro Capacitivo $v_c(t)$ à Tensão da Rede

A Figura 3.34 apresenta os eventos citados no gráfico (a). No gráfico (b) observa-se a resposta do estágio retificador trifásico e no gráfico (c) a resposta do filtro capacitivo.

Os parâmetros utilizados para obtenção dos gráficos, foram os mesmos do item anterior, para a fonte chaveada monofásica.

As curvas de (1) a (6), mostradas no gráfico, obedecem às mesmas definições mostradas para fontes chaveadas monofásicas e as equações de respostas são as mesmas, substituindo-se o termo “ $e(t)$ ” por $V'_{PN}(t)$.

Notar que o evento 1 (afundamento de 80% em uma das fases durante 3 ciclos) quase não afetou a tensão de alimentação da carga, enquanto que o evento 3 (elevação de 50% durante apenas 1 ciclo), causou uma significativa sobre-tensão na carga. Estas questões serão objeto de discussão no próximo capítulo.

Capítulo 4

Caracterização de Cargas Sensíveis a VTCDs

No capítulo anterior foram analisadas as respostas de cargas do tipo impedância constante, corrente constante e potência constante alimentadas através de fontes CC, quando submetidos a afundamentos e elevações da tensão na entrada. Modelos de simulação foram apresentados para as principais configurações de fontes monofásicas e trifásicas. Verificou-se que os armazenadores de energia das fontes CC desempenham papel decisivo nas características de resposta a esses eventos.

Neste capítulo o objetivo é identificar as curvas limite de tolerância dessas cargas, tanto para afundamentos como elevações da tensão. A partir dessas curvas serão identificados os parâmetros característicos que irão ser utilizados para estabelecer uma metodologia ou critério para ensaios das cargas e avaliação do real impacto que um evento, observado na rede, possa causar sobre as cargas estudadas. Espera-se, com isso, obter resultados mais confiáveis sobre a vulnerabilidade das cargas do que os métodos atuais têm apresentado.

Partindo da definição geral de distúrbio como sendo qualquer fenômeno eletromagnético (evento na rede elétrica), cujo impacto causa algum tipo de interferência ou prejuízo em equipamento, processo do consumidor ou incômodo ao usuário [41], constata-se que essa definição pode ser utilizada para caracterizar o que seria uma carga sensível:

Carga sensível é aquela que apresenta mau funcionamento temporário ou danos permanentes devidos aos impactos causados por distúrbios eletromagnéticos.

De acordo com esta definição, percebe-se que o nível de tolerância dos equipamentos, dos processos ou das pessoas é que deve determinar o que é factível ou aceitável em termos normativos, relacionados com distúrbios eletromagnéticos. Cargas podem ser mais ou menos sensíveis, dependendo do seu nível de tolerância aos distúrbios. No entanto, as normas existem para estabelecer limites toleráveis ou aceitáveis, que devem servir como balizadores aos fabricantes de equipamentos sujeitos aos impactos de tais distúrbios, provendo-os de características que atendam tais limites.

No decorrer deste capítulo serão apresentados e definidos os parâmetros das cargas sensíveis, de como estes influenciam na resposta dos equipamentos eletrônicos e, com base neste conhecimento, será proposto um indicador mais realista na avaliação do impacto de afundamentos e elevações de tensão em uma ou múltiplas cargas sensíveis.

4.1 Cargas Sensíveis a Afundamentos de Tensão

Uma vez que os efeitos causados por afundamentos de tensão estão relacionados ao mau funcionamento temporário, enquanto as elevações de tensão podem causar danos irreversíveis aos equipamentos elétricos, é adequado tratar tais situações separadamente. Apesar das curvas de tolerância para afundamento e elevações de tensão serem obtidas através de diferentes ensaios, ambas representam os limites reais para VTCDs impostos pela rede.

4.1.1 Limites de Tolerância a Afundamento de Tensão

No capítulo anterior verificamos que cargas eletrônicas, alimentadas através de fontes CA-CC, podem se comportar como impedância, corrente ou potência constante durante a fase de carga e descarga do capacitor, filtro capacitivo, da fonte. A fase de carga do capacitor ocorre quando a entrada impõe uma tensão maior que a tensão sobre o capacitor (diodos do retificador em condução) e a fase de descarga, quando a tensão do capacitor é maior que a tensão imposta pela entrada (diodos do retificador abertos).

Portanto, no caso de afundamentos da tensão da rede a carga será suprida pela energia armazenada no capacitor da fonte, o qual se descarrega em função do tipo de carga que está sendo alimentada.

Verificou-se que existe uma tensão mínima ($V_{mín}$), necessária para manter a funcionalidade dos componentes eletrônicos da carga (SED), e se constatou que, enquanto essa

tensão mínima não é atingida, o impacto do evento da rede não afeta a carga que está sendo alimentada. O ponto em que $V_{\min}$ é alcançada foi designado Ponto de Desligamento (PD).

Assim pode-se definir três parâmetros básicos que caracterizam o limite de tolerância de uma carga alimentada através de fontes CC frente a afundamentos de tensão. Esses parâmetros são:

1. **Tensão Mínima ($V_{\min}$)** [1]: mínima tensão *em regime permanente* que a carga suporta sem ocorrer mau funcionamento ou desligamento.
2. **Duração Máxima ($t_{\max}$)** [1]: máxima duração de um evento, durante o qual a tensão pode ficar abaixo do valor mínimo “ $V_{\min}$ ”, supondo tensão inicial nominal.
3. **Curva de Descarga** [42,43]: é a característica de descarga dos elementos armazenadores de energia, em geral o filtro capacitivo, e que é função do tipo da carga alimentada:
 - Impedância Constante [42,43];
 - Corrente Constante [42,43];
 - Potência Constante [1].

As curvas de decaimento ou de descarga do filtro capacitivo já foram apresentadas no Capítulo 3. A Figura 4.1 mostra a composição dos parâmetros que determinam a curva limite de tolerância a afundamentos da tensão para uma carga tipo impedância constante, alimentada através de fontes CC.

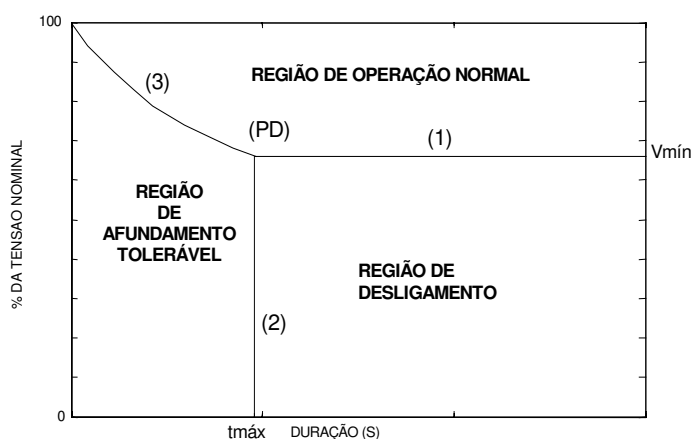


Figura 4.1 - Limites de Tolerância ou Sensibilidade a Afundamentos de Tensão.

- (1) Limite de Tensão Mínima ($V_{\min}$)
- (2) Limite de Duração Máxima Tolerada ($t_{\max}$)
- (3) Curva de Descarga da Fonte CC

Fica claro que os limites de tolerância definem três regiões com características distintas de operação:

- Operação Normal;
- Afundamento Tolerável;
- Desligamento.

Região de Operação Normal

A Região de Operação Normal corresponde à região acima da tensão “ $V_{\min}$ ” e da curva de descarga da fonte CC para o tipo de carga que está sendo alimentado. Um evento na rede cujo perfil de tensão sobre a carga permaneça nessa região, não desligará a carga, mesmo que tenha duração infinita. A Figura 4.2 mostra um exemplo de evento que está contido na região de operação normal.

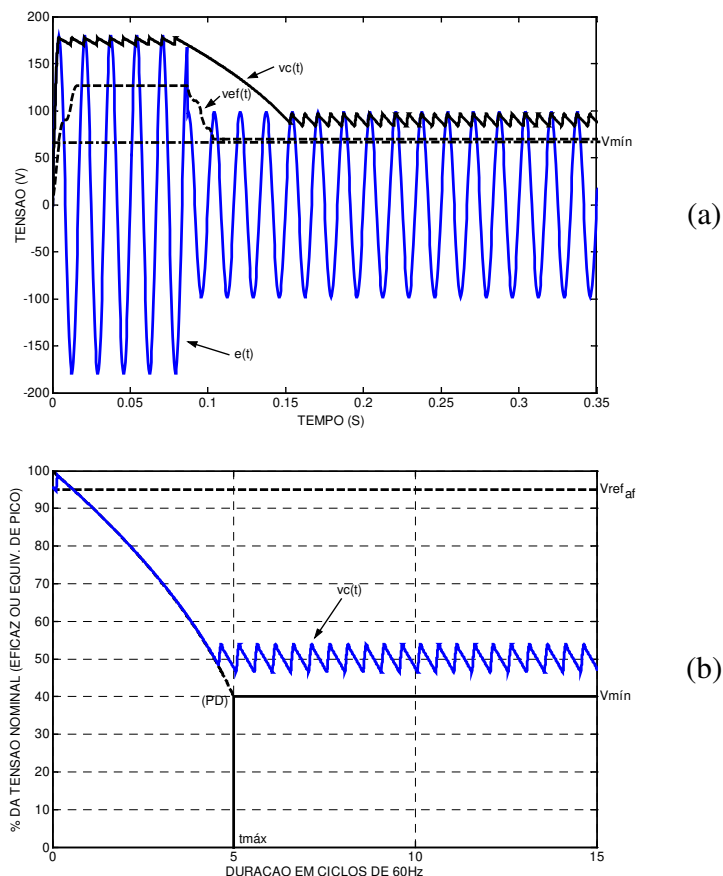


Figura 4.2 (a) e (b) – Evento na Região de Operação Normal.

Região de Afundamento Tolerável

A Região de Afundamento Tolerável fica abaixo da curva de descarga do filtro capacitivo com o tempo de duração máxima “ $t_{m\acute{a}x}$ ”. Na região de afundamento tolerável a tensão de entrada (rede) pode assumir qualquer perfil de evolução temporal, podendo chegar a zero (interrupção), porém o tempo que a tensão de entrada pode permanecer abaixo da tensão mínima “ $V_{m\acute{i}n}$ ” não pode ser superior a “ $t_{m\acute{a}x}$ ”. A Figura 4.3 mostra um evento que adentra a região de afundamento tolerável.

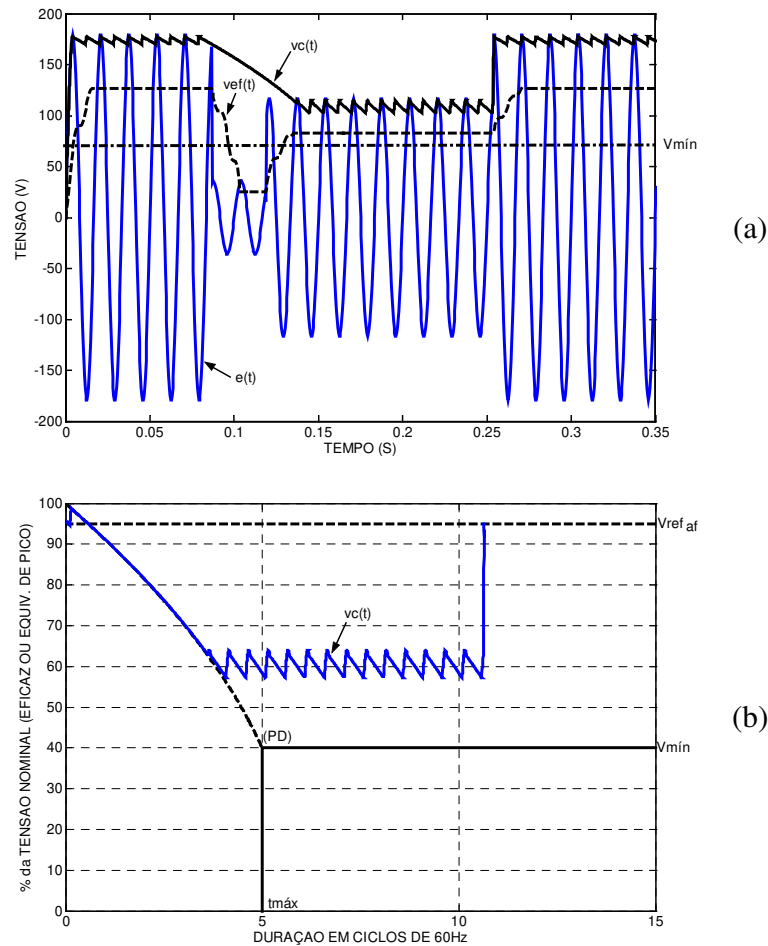


Figura 4.3 (a) e (b) - Evento na Região de Afundamento Tolerável.

Notar que o afundamento inicial, primeiro patamar do afundamento de tensão, não causa impacto na carga, que continua sendo alimentada em função da tensão sobre o capacitor $vc(t)$.

Região de Desligamento

A Região de Desligamento fica abaixo da tensão “ $V_{mín}$ ” e com duração maior que “ $t_{máx}$ ”. Um evento que adentre esta região causará mau funcionamento da carga com perda parcial de informações e funções ou o desligamento do equipamento e perda total das informações e funções.

Notar que a duração máxima “ $t_{máx}$ ” está intrinsecamente ligada à tensão mínima “ $V_{mín}$ ” e à curva de descarga. O ponto onde essas curvas se cruzam determina o ponto de desligamento “PD” de uma carga. Na Figura 4.4 tem-se um evento que invade a região de desligamento.

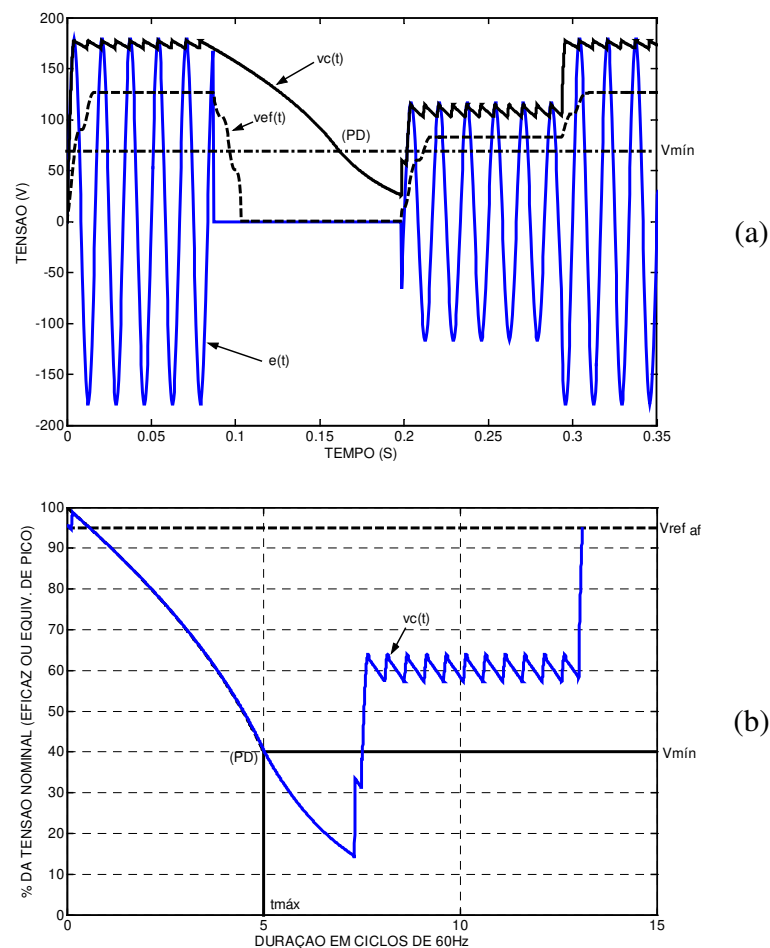


Figura 4.4 (a) e (b) - Evento que adentra a Região de Desligamento.

O exemplo mostra que, apesar da interrupção da alimentação ter durado vários ciclos, a tensão na carga não chegou a zero, apenas caiu abaixo do limite mínimo tolerável.

Conclusão

Dessa análise conclui-se que o ponto PD, o qual representa o encontro das três regiões características de operação da carga, pode ser considerado como o parâmetro chave para avaliar o impacto que um afundamento de tensão na rede irá causar sobre uma determinada classe de cargas sensíveis.

Essa é uma conclusão a ser verificada através de ensaios em laboratório e que serão apresentados no capítulo 5.

4.1.2 Exemplo de Afundamento que Causaria Impacto em Carga Sensível

A Figura 4.5 apresenta um evento que causaria desligamento em uma carga sensível, supondo que a fonte CC alimente um SED tipo impedância constante e a relação da tensão de entrada “ $e(t)$ ” para a tensão no filtro capacitivo “ $v_C(t)$ ” seja (1:1).

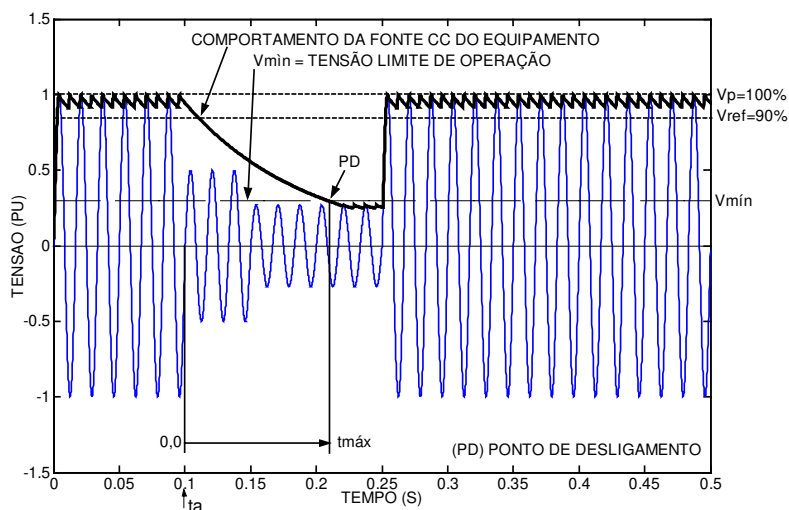


Figura 4.5 - Evento de Afundamento de Tensão que causa Desligamento.

Notar que o evento na rede apresenta dois níveis de afundamento, sendo que a transição passa despercebida pela carga uma vez que a tensão sobre o filtro capacitivo é maior que a tensão de entrada. Nessa condição os diodos do retificador permanecem abertos (polarização reversa) e o capacitor segue se descarregando sobre a carga até que a tensão $v_C(t)$ atinja o nível mínimo $V_{mín}$. Isso ocorre em $t_{máx}$ e define o ponto de desligamento (PD) da carga. A partir daí, mesmo que a tensão da entrada volte ao nível normal, o impacto sobre a carga já ocorreu e, portanto, esse evento causaria desligamento.

4.2 Cargas Sensíveis a Elevações de Tensão

No caso de elevações da tensão, os problemas relacionados com a operação de cargas sensíveis são mais críticos, uma vez que podem ocorrer danos irreversíveis nos componentes das cargas ou mesmo da fonte CC. Por isso é mais difícil obter dados confiáveis para caracterizar um limite de tolerância para elevações de tensão das cargas. A abordagem aqui apresentada busca seguir a metodologia adotada para afundamentos.

4.2.1 Curva de Tolerância a Elevações de Tensão

No capítulo anterior verificou-se que se a entrada da fonte CC impuser uma tensão maior que a tensão existente no capacitor de saída da fonte, irá ocorrer o processo de carga do capacitor. Nessa condição os diodos do retificador conduzem, pois estão polarizados diretamente.

Portanto, no caso de elevações de tensão da rede, será imposta uma carga adicional aos capacitores do filtro da fonte, que acumulará energia excedente para suprir a carga que está sendo alimentada.

Neste caso a tensão do capacitor poderá aumentar além do valor máximo tolerável ($V_{m\acute{a}x}$) para a operação normal do equipamento ou mesmo passar do limite (V_{iso}), que causa ruptura do isolamento de componentes, danificando o equipamento.

Assim, o impacto de uma elevação de tensão sobre uma carga sensível, como no caso de afundamentos de tensão, é conseqüência da interação da tensão de entrada com os elementos da fonte CC: conversor CA-CC, o filtro capacitivo e o SED que está sendo alimentado.

Podemos admitir que existem três parâmetros básicos que caracterizam o limite de tolerância de uma carga alimentada através de fonte CC frente a elevações de tensão. Esses parâmetros são:

1. **Tensão Máxima ($V_{m\acute{a}x}$)** [42,43]: maior tensão, *em regime permanente*, que uma carga suporta sem apresentar mau funcionamento por saturação ou sobreaquecimento;
2. **Tensão de Ruptura (V_{iso})** [42,43]: máxima tensão suportada pela carga sem que ocorra ruptura de isolamento de algum componente;
3. **Curva Limite de Dano** [42,43]: limite máximo de tempo que a carga suporta uma dada elevação de tensão, sem apresentar mau funcionamento nem sofrer algum tipo de dano. Essa curva pode ser obtida experimentalmente pela aplicação de elevações controladas, cuja duração é determinada pelo momento da falha da carga sensível.

A composição dos três parâmetros para elevações de tensão permite definir os limites de tolerância a elevações de tensão. A Figura 4.6 apresenta o formato geral da curva de tolerância a elevações de tensão. Ela determina quatro regiões de operação distintas, a saber:

- Operação Normal;
- Elevações Toleráveis;
- Dano por Sobrecarga;
- Ruptura de Isolação.

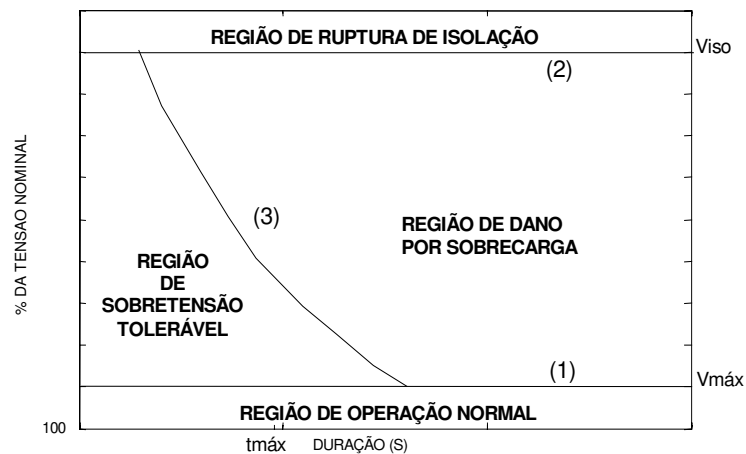


Figura 4.6 - Curva de Tolerância a Elevações de Tensão.

- (1) Limite de Tensão Máxima ($V_{máx}$)
- (2) Limite de Tensão de Isolação (V_{iso})
- (3) Curva Limite de Dano

Região de Operação Normal

A Região de Operação Normal tem como limitante superior a tensão máxima “ $V_{m\acute{a}x}$ ”. Qualquer elevação de tensão que fique nessa região pode perdurar indefinidamente, em regime permanente, que a carga não deverá apresentar qualquer tipo de falha ou dano. Observar que a tensão “ $V_{m\acute{a}x}$ ” é superior à tensão nominal de operação do equipamento. Na Figura 4.7 é mostrada uma elevação de tensão que margeia a tensão máxima “ $V_{m\acute{a}x}$ ”.

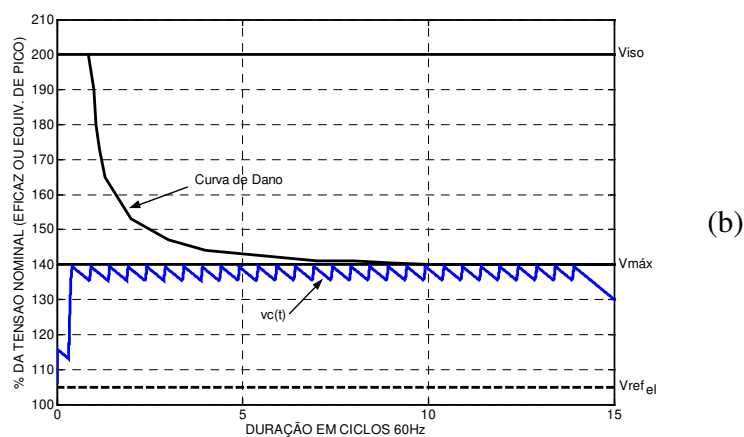
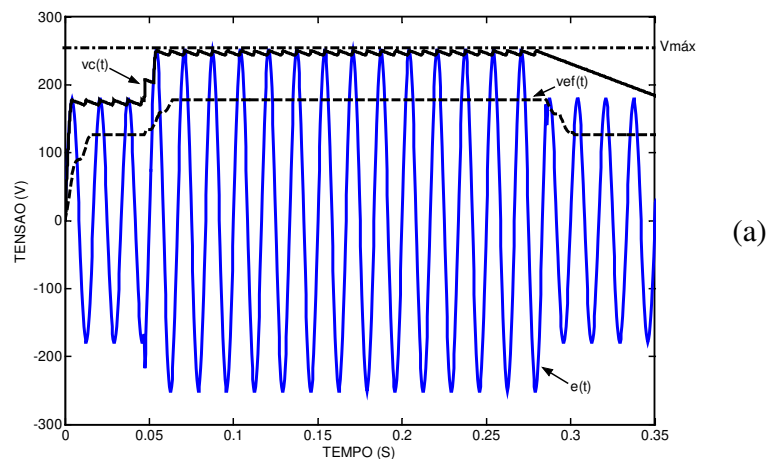


Figura 4.7 (a) e (b) - Evento na Região de Operação Normal.

A curva de dano mostrada na Figura 4.7 (b) é fictícia e tem caráter apenas ilustrativo.

Região de Elevações Toleráveis de Tensão

A Região de Elevações Toleráveis é definida acima de “ $V_{m\acute{a}x}$ ”, à esquerda da curva limite de dano e abaixo de “ V_{iso} ”. Uma elevação da tensão na rede que força a tensão do filtro capacitivo da fonte CC a adentrar essa região, por hipótese, não causará falha ou dano de curto prazo na carga. No entanto, pode ocorrer sobrecarga de componentes, diminuindo a vida útil do equipamento.

Na Figura 4.8 é mostrado um evento que faz a tensão do capacitor violar o limite $V_{m\acute{a}x}$ por algum tempo, mas sem violar a curva de dano. Notar que o valor eficaz da tensão durante esse evento não expressa o real impacto causado sobre a carga.

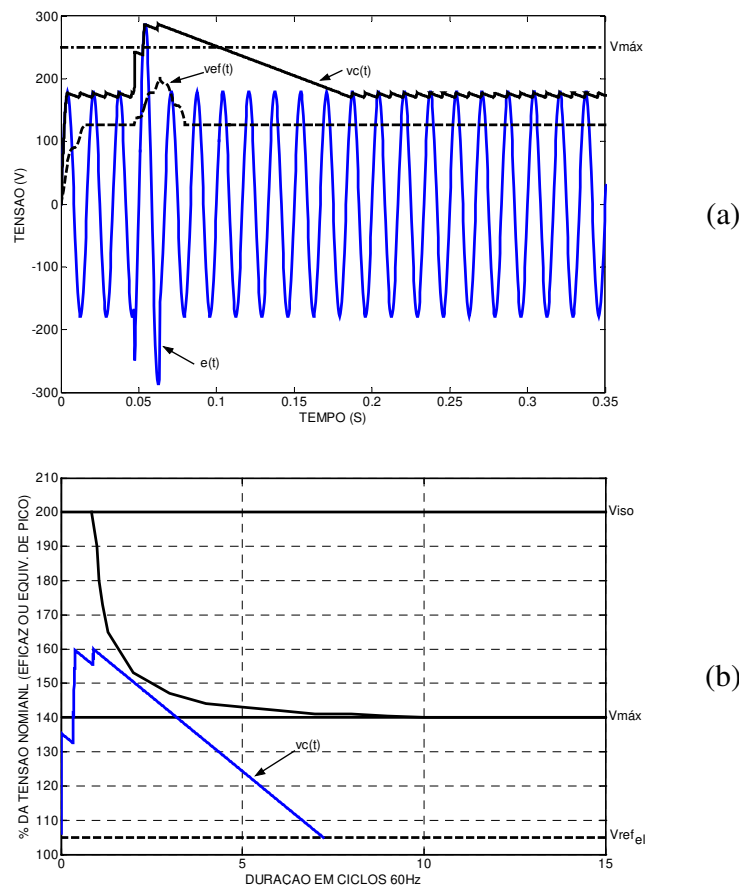


Figura 4.8 (a) e (b) - Evento na Região de Elevações Toleráveis.

Região de Dano por Sobrecarga

Na Região de Dano a tensão do filtro capacitivo assume valores entre “ $V_{m\acute{a}x}$ ”, e “ V_{iso} ” com a duração maior que a indicada pela curva de dano. Um evento da rede que force a tensão do filtro capacitivo a adentrar essa região poderia causar dano irreversível na carga sensível.

Na Figura 4.9 pode ser visto um evento de elevação que causaria dano em uma carga sensível.

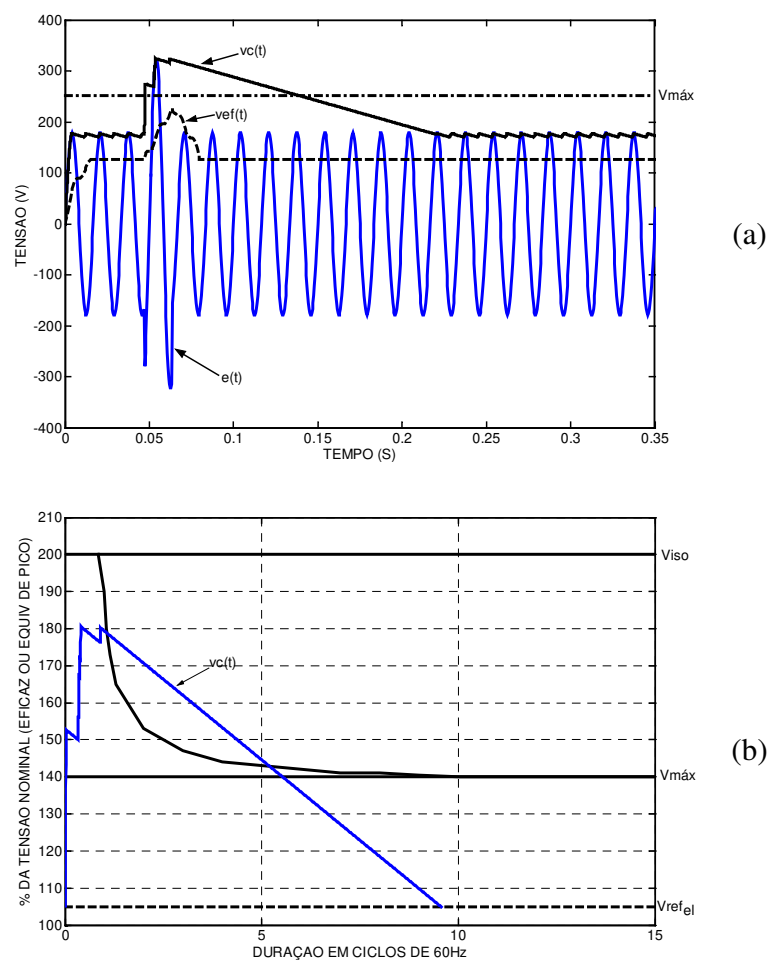


Figura 4.9 (a) e (b) - Evento na Região de Dano.

Novamente, o valor eficaz da tensão da rede não mostra o real impacto que o evento causa sobre a carga eletrônica.

Região de Ruptura de Isolação

A Região de Ruptura de Isolação ou Dielétrico corresponde a tensões do filtro capacitivo superiores a “Viso”. Independente da duração, se a tensão do capacitor chegar a esse limite irá ocorrer a ruptura do dielétrico ou meio isolante, danificando componentes do equipamento.

O dano causado por um evento nesta região não é devido ao aquecimento, ou incapacidade de dissipação térmica e sim a suportabilidade da diferença de potencial elétrico. Na Figura 4.10 observa-se um surto que viola o limite “Viso”.

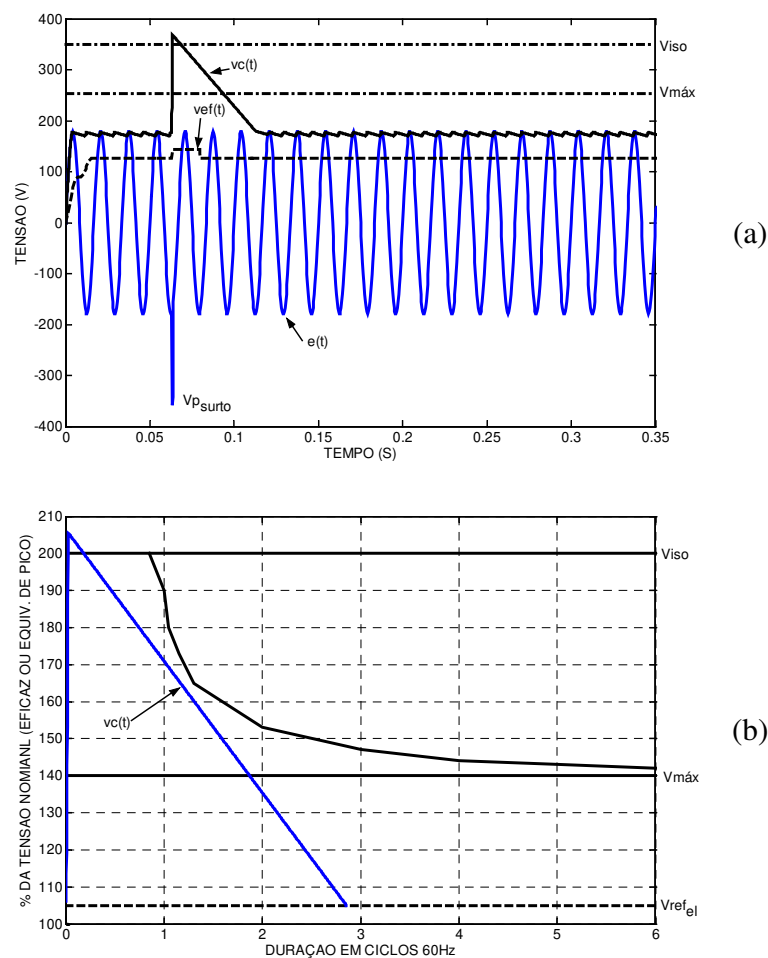


Figura 4.10 (a) e (b)- Evento na Região de Ruptura de Dielétrico.

Devido à curta duração, o valor eficaz novamente não é capaz de expressar o dano causado pelo evento.

4.2.2 Elevações de Tensão Causadoras de Impacto em Cargas Sensíveis

Da mesma maneira que a análise para afundamentos de tensão, o impacto de elevações de tensão está relacionado à interação entre a tensão do filtro capacitivo e o SED.

Na Figura 4.11, tem-se um evento de elevação de 130% da tensão nominal da rede, com duração de quatro ciclos.

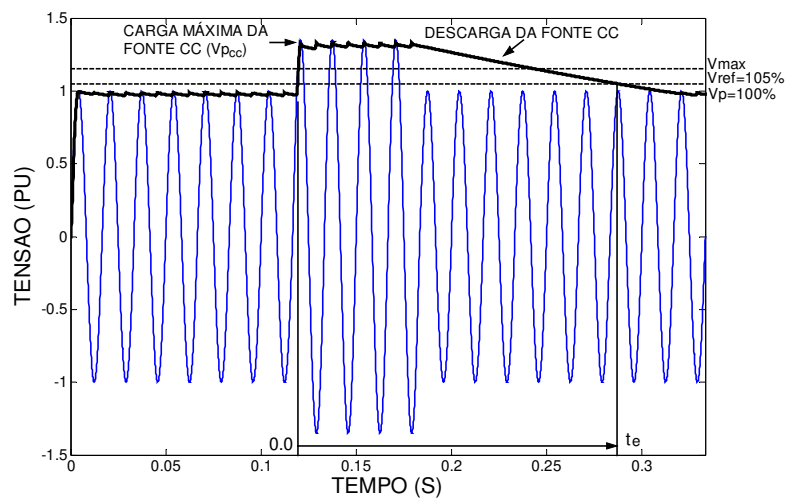


Figura 4.11 - Evento de Elevações de Tensão e a Resposta observada pela Carga Sensível.

Apesar da elevação da tensão na rede durar apenas 4 ciclos, a energia excedente acumulada pelo filtro capacitivo causa um prolongamento da elevação de tensão imposta ao SED, mais que dobrando a sua duração sobre a carga alimentada. O tempo de decaimento da tensão ao final do evento da rede poderia ser longo o suficiente para invadir a região de dano, o que poderia significar a queima de algum componente da carga.

4.3 Obtenção dos Parâmetros a partir das Curvas de Carga e Descarga do Filtro Capacitivo

Pelo exposto até aqui, foi mostrado que as curvas de tolerância a afundamento e elevação da tensão de alimentação do lado CC descrevem os limites que uma importante classe de cargas sensíveis suporta. Também ficou claro que o impacto real dos eventos não é expresso adequadamente pela variação eficaz das tensões do lado CA, como recomendado pela maioria das normas atuais.

Neste item será apresentada a metodologia utilizada para extrair os parâmetros que permitem obter as curvas de tolerância de cargas alimentadas através de fonte CC. Existem duas maneiras de se obter esses parâmetros: forma direta ou indireta. A primeira pode ser aplicada tanto para elevações como para afundamentos de tensão e a segunda só é aplicada a afundamentos de tensão. Ainda será mostrado que a técnica pela forma direta é mais adequada aos fabricantes dos equipamentos, enquanto a forma indireta é mais adequada aos consumidores finais ou as concessionárias de energia elétrica.

Um ponto importante a ser salientado para elevações de tensão é que os parâmetros que determinam o impacto do evento dificilmente podem ser obtidos pelo usuário final do equipamento. Esses parâmetros deveriam ser fornecidos pelos fabricantes, uma vez que os ensaios são destrutivos e, portanto, seriam necessárias muitas unidades do equipamento para ser obter as características aplicáveis para elevações de tensão.

No entanto, a resposta de carga e descarga do filtro capacitivo da fonte CC é conveniente para fins do estudo do impacto tanto de elevações como de afundamentos de tensão, considerando que as cargas reais apresentam as características estudadas no capítulo anterior (impedância, corrente e potência constante). No caso de não se dispor de informações sobre o tipo da carga, pode-se tomar o pior caso como base para extração dos parâmetros de tolerância representativos dessa carga.

4.3.1 Obtenção dos Parâmetros de Forma Direta ou Invasiva

Esta metodologia é mais precisa que a indireta, que será apresentada posteriormente, porém implica em acesso ao interior do equipamento, ou seja, tem-se que abrir o equipamento para poder realizar os ensaios necessários para extrair os parâmetros desejados.

Uma vez que o equipamento possa ser aberto, a primeira característica a ser observada é o valor da capacitância “C” do filtro capacitivo na saída do conversor CA-CC. Os demais parâmetros são obtidos em laboratório pela análise de resposta da tensão do filtro capacitivo, utilizando-se de osciloscópio para obtenção das respostas de carga e descarga desse filtro, com aplicação de tensões de entrada através de uma fonte CA controlada, como indicado na Figura 4.12. Nesse exemplo a fonte de alimentação do equipamento não utiliza transformador de entrada, como é típico em fontes chaveadas.

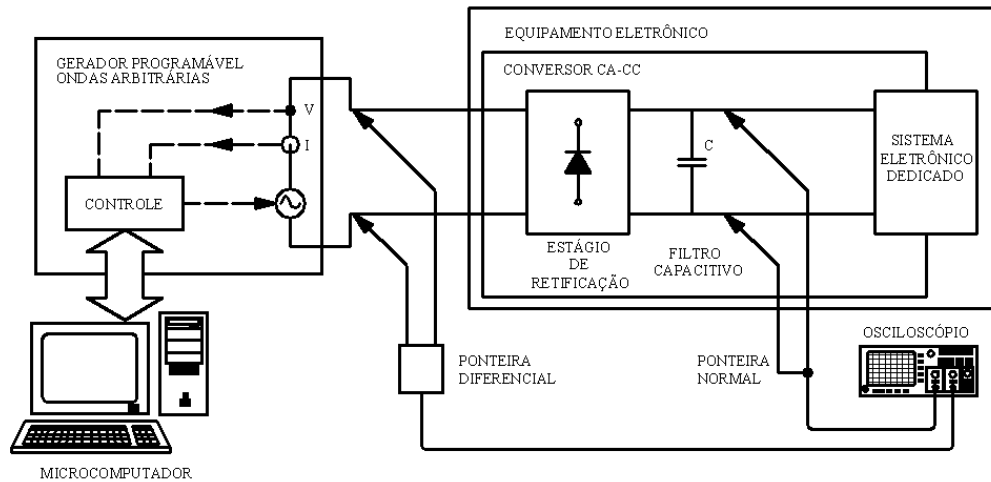


Figura 4.12 – Esquema usado para obtenção das Curvas de Carga e Descarga do Filtro Capacitivo.

Obtenção da Característica de Descarga do Filtro Capacitivo

Inicialmente ajusta-se na entrada do equipamento uma tensão correspondente ao regime nominal de trabalho e, em determinado instante “ t_1 ” é imposta uma interrupção, prolongada o suficiente para que o osciloscópio capture a resposta do filtro capacitivo “ $v_C(t)$ ” desde seu ponto de máxima carga “ $v_C(t) = V_{pcc}$ ” até seu ponto mínimo “ $v_C(t) = 0$ ”, conforme Figura 4.13.

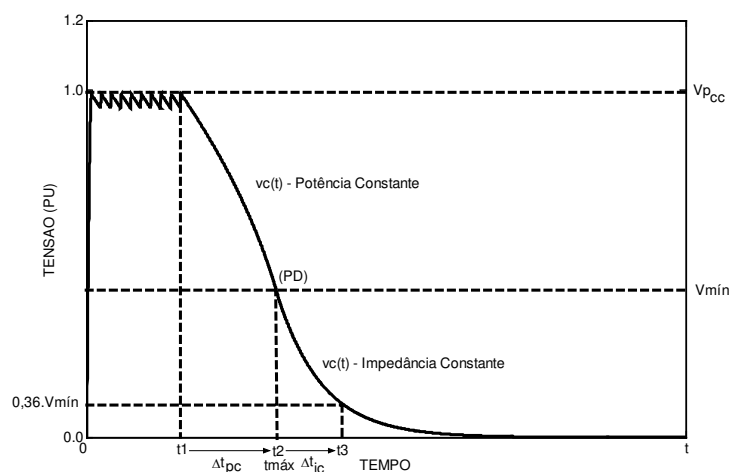


Figura 4.13 - Resposta do Filtro Capacitivo a uma Interrupção Prolongada.

Por inspeção da Figura 4.13, pode-se concluir que o equipamento sob ensaio se comporta, em regime normal, como SED de potência constante, mudando de comportamento a partir de um determinado instante para impedância constante.

O ponto de transição entre os dois tipos de decaimento da tensão “ $v_c(t)$ ” determina o ponto de desligamento da carga “PD” e este ponto é também o indicador da tensão mínima de funcionamento do equipamento “ $V_{mín}$ ”. Do início da interrupção “ $v_c(t) = V_{pcc}$ ”, no instante “ t_1 ”, até o ponto de desligamento “PD”, caracterizado como “ t_2 ”, tem-se a duração máxima, ou seja, “ $t_{máx}$ ”.

A curva de descarga, mais o ponto de desligamento, permite descrever a curva limite de tolerância a afundamentos de tensão neste tipo de carga. No entanto, como se tem acesso ao circuito interno da fonte CC, pode-se também determinar os demais parâmetros do modelo da carga eletrônica (filtro capacitivo mais o SED) que possibilita o estudo do comportamento da carga frente a qualquer tipo de evento. A obtenção desses parâmetros adicionais é descrita a seguir:

Uma vez que:

$$t = t_2 - t_1 = t_{max}$$

$$V_o = V_{pcc}$$

$$v_c(t_2) = V_{mín}$$

pode-se determinar o valor da potência “ P_c ”, correspondente ao SED de potência constante, para substituição na equação 3.30:

$$v_c(t) = \sqrt{V_o^2 - \frac{2 \cdot P_c \cdot t}{C}} \rightarrow v_c(t_2) = V_{mín} = \sqrt{V_{pcc}^2 - \frac{2 \cdot P_c \cdot t_{max}}{C}}$$

ou seja:

$$P_c = \frac{C}{2 \cdot t_{max}} (V_{pcc}^2 - V_{mín}^2) = \frac{C}{2} \frac{(V_{pcc}^2 - V_{mín}^2)}{(t_2 - t_1)} \quad (4.1)$$

Do mesmo modo é possível obter o valor de “ R ” equivalente para o SED de impedância constante, a partir da curva de descarga entre os instantes “ t_2 ” e “ t_3 ”. Para isso basta obter a constante de tempo correspondente a essa curva, que se inicia em $t = t_2$, com tensão inicial $v_c(t_2) = V_{mín}$:

$$\tau_d = R \cdot C \quad (4.2)$$

A constante de tempo para descarga de um circuito RC, é obtida medindo-se o tempo que a tensão leva para atingir 36,79% do valor inicial ($V_{mín}$). Esse instante foi designado como “ t_3 ”

na Figura 4.13. Portanto, obtém-se:

$$\tau_d = t_3 - t_2 = R \cdot C$$

$$R = \frac{t_3 - t_2}{C} \quad (4.3)$$

Em alguns casos, a transição de características é tão suave que a determinação do ponto PD (instante “t₂”) por inspeção, fica difícil. Neste caso, é necessário programar afundamentos de tensão controlados e com isso determinar o nível de tensão mínima “V_{mín}”, no qual ocorre o desligamento da carga.

Pode também ocorrer da constante de tempo após o desligamento ser muito grande, dificultando a sua determinação através de osciloscópio. Isso ocorre quando o estado desligado da carga apresenta alta impedância ou circuito aberto. Nestes casos é válido supor $R \rightarrow \infty$, mas para fins de modelagem neste caso deve-se supor um valor muito grande de R.

Obtenção da Característica de Carga do Filtro Capacitivo

Para obter a resposta de carga do equipamento e demonstrar as atenuações do impacto de surtos ou transitórios rápidos em carga sensíveis, a análise também será baseada na Figura 4.12, para testes e ensaios.

Aplicando-se um degrau controlado de tensão com valor máximo “V_u”, de modo que seja possível observar a resposta de carga do filtro capacitivo sem causar dano ao equipamento ($V_u < V_{m\acute{a}x}$), obtém-se uma curva típica, mostrada na Figura 4.14.

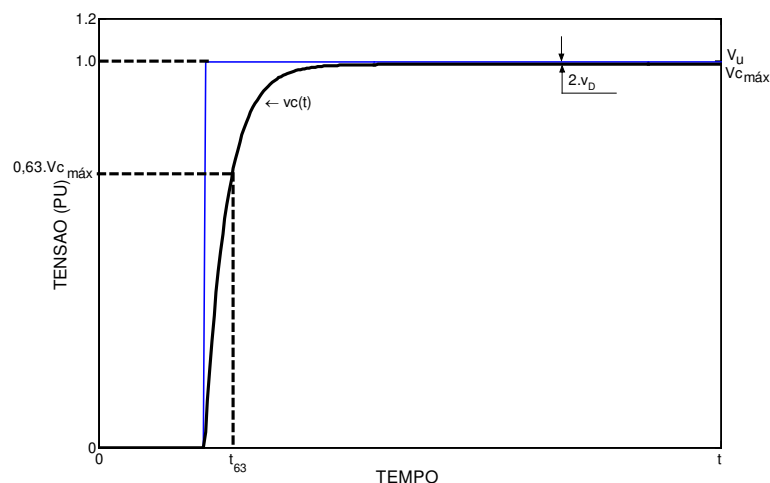


Figura 4.14 - Resposta de Carga a um Degrau de Tensão.

Algumas considerações devem ser feitas para obtenção da resposta de carga do filtro

capacitivo.

A primeira hipótese será supor que a fonte esteja operando em vazio. Essa hipótese se baseia no fato de o processo de carga imposto pela rede ser muito mais rápido que o processo de descarga, imposto pela carga. Por essa razão, o tipo da carga pouco influencia na característica de carga do filtro capacitivo.

Assim, a resposta de carga do filtro capacitivo será definida pela resistência da ponte retificadora e a capacitância do filtro. O sistema resultante apresenta características de um circuito RC, em que “R” representa o correspondente “ $2r_D$ ” dos diodos e o valor de “C” é dado pelo filtro capacitivo. Como o valor de “C” já foi obtido pelo ensaio de afundamento da tensão, tem-se como incógnita o valor de “R”, que no caso é igual a “ $2r_D$ ”. Considerando a equação (4.4) para carga do capacitor

$$v_C(t) = V_{C_{máx}} \cdot (1 - e^{-t/R \cdot C}) \quad (4.4)$$

e extraíndo a constante de tempo da curva da Figura 4.14, ou seja, tomando-se o tempo que a tensão do capacitor leva para chegar a 63% do valor final ($\tau_C = t_{63}$), obtém-se o valor da resistência interna do estágio de retificação:

$$r_D = \frac{t_{63\%}}{2 \cdot C}$$

Como não se considerou transformador de entrada, não temos os efeitos de “Req₂” nem “Leq₂” que atenuam surtos rápidos da rede. Este modelo é característico de fontes chaveadas e não de fontes com reguladores lineares.

Importante salientar que este tipo de ensaio é possível de ser feito em laboratório onde se impõe uma condição quase ideal de tensão na entrada no equipamento, ou seja, barramento infinito e reatância de alimentador quase nula.

Em termos práticos, o que normalmente determina a capacidade de carga do filtro capacitivo são os elementos série externos ao equipamento, por exemplo: alimentador que supre tal equipamento e transformador deste alimentador, mas para determinação dos parâmetros da fonte CC tal ensaio proposto é válido, já que esses elementos série não são parte integrante do equipamento.

No caso de haver transformador de entrada, é necessário obter os parâmetros de interesse (“Req₂” e “Leq₂”), através do ensaio do transformador sob curto no secundário, como sugerido na Figura 4.15.

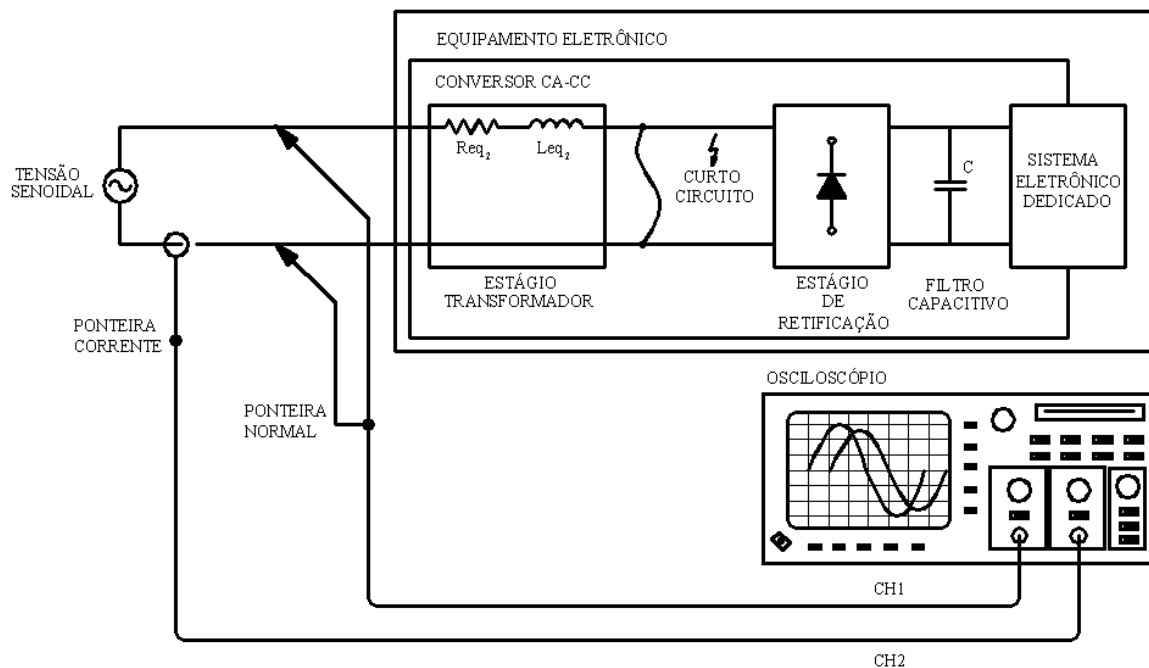


Figura 4.15 - Esquema para Obtenção dos Parâmetros do Transformador de Entrada da Fonte CC.

Observar que o ato de colocar o secundário em curto-circuito não implica em danos ao equipamento já que a corrente não irá passar pelos elementos eletrônicos a jusante, e colocar o secundário em curto-circuito é relativamente simples, pois não requer a desconexão do secundário, bastando a identificação dos terminais do secundário e, com um “jumper”, fechar o curto-circuito no próprio dispositivo.

Utilizando-se a ponte de corrente do osciloscópio no secundário ajusta-se a corrente nominal “ I_2 ” variando a tensão de entrada senoidal. Essa mesma ponte é colocada no primário do transformador em conjunto com a ponte de tensão, Figura 4.15, permitindo obter a defasagem angular “ ϕ ” entre tensão “ V_1 ” e corrente “ I_1 ” no primário.

A magnitude da impedância de curto do transformador é dada pela relação “ $Z_{1cc}=V_1/I_1$ ”. Retirando-se o curto-circuito pode-se estimar a relação de transformação pela razão “ $a=V_1/V_2$ ”.

Dessa forma pode-se calcular os parâmetros do transformador para estudo de cargas sensíveis para afundamentos e elevações de tensão que, refletidos para o secundário, são definidos por:

Equivalente da reatância de dispersão no secundário “ Xeq_2 ”:

$$Xeq_2 = \frac{Z_{1cc}}{a^2} \cdot \sin \phi \quad (4.5)$$

resultando a indutância secundária “ Leq_2 ”:

$$Leq_2 = \frac{Xeq_2}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.6)$$

E o equivalente da resistência de dispersão no secundário “ Req_2 ”:

$$Req_2 = \sqrt{\left(\frac{Z_{1cc}}{a^2}\right)^2 - (Xeq_2)^2} \quad (4.7)$$

A queda de tensão no estágio de retificação pode ser obtida da diferença entre a tensão de pico “ V_{p2} ” no secundário do transformador e a tensão de pico do ripple “ V_{pcc} ” observado no filtro capacitivo, conforme equação (4.4).

$$v_D = \frac{V_p - V_{pcc}}{2} \quad (4.8)$$

Uma consideração de ordem prática, em relação ao modelo, é que o valor da resistência equivalente do transformador é muitas vezes superior ao valor da resistência interna do estágio de retificação ($Req_2 \gg 2r_D$). Assim, quando existe transformador abaixador na entrada, pode-se considerar a resistência do estágio de retificação desprezível ($2r_D = 0$).

Com isso foram obtidos os parâmetros que permitem compor o modelo de simulação da carga eletrônica (fonte CC e SED) para estudos de carga e descarga do filtro capacitivo. No próximo item será discutida a obtenção de parâmetros quando não se tem acesso ao interior da fonte CC nem da carga alimentada.

4.3.2 Obtenção de Parâmetros de Forma Indireta ou Não Invasiva

A metodologia indireta tem como grande vantagem o fato de não requerer acesso ao interior do equipamento, ou seja, não é invasiva. A desvantagem desta metodologia indireta, é que só é aplicável ao estudo de afundamentos de tensão e não ao estudo de elevações de tensão, que seriam destrutivos. Além disso, os parâmetros são extraídos a partir de medidas observadas na entrada CA e não das medidas sobre o filtro capacitivo.

Para a caracterização indireta do equipamento é necessário dispor de uma fonte de tensão de potência igual ou superior à do equipamento e que seja possível gerar e controlar afundamentos de tensão, tanto em magnitude como em duração.

Obtenção da Tensão Mínima de Alimentação ($V_{mín_{CA}}$)

Com o equipamento em teste conectado a uma fonte controlada (Gerador de VTCDs) gera-se afundamentos de longa duração, superiores a 1 minutos ou o tempo suficiente para considerar que o novo nível de tensão entrou em regime permanente. Neste caso, por falta de acesso ao filtro capacitivo, os ensaios têm que ser monitorados pelo lado CA (entrada da alimentação).

Por essa razão é necessário gerar uma sucessão de afundamentos, até se encontrar aquele que cause o desligamento do equipamento. O nível imediatamente superior ao do desligamento será considerado como sendo o da mínima tensão de alimentação CA tolerável, " $V_{mín_{CA}}$ ".

Obtenção da Máxima Duração de Interrupção ($t_{máx_{CA}}$)

Para obter esse parâmetro geram-se interrupções de alimentação com durações crescentes até se observar o desligamento da carga sensível.

Será considerada como duração máxima de interrupção da alimentação " $t_{máx_{CA}}$ ", aquela do evento imediatamente anterior ao que causou o desligamento do equipamento. Em todos os casos a tensão pré-evento deve ser a nominal " V_n ".

Testes mostram que cargas eletrônicas sensíveis desligam sempre no mesmo " $t_{máx_{CA}}$ " para afundamentos abaixo de " $V_{mín_{CA}}$ ". Isso confirma a hipótese de que para tensão de entrada menor que " $V_{mín_{CA}}$ " o tempo de sobrevida da carga depende não mais da entrada e sim do processo de descarga do filtro capacitivo da fonte.

Portanto, " $V_{mín_{CA}}$ " e " $t_{máx_{CA}}$ " estão associados ao ponto de desligamento "PD" da curva de descarga do capacitor(es) do filtro capacitivo. A diferença entre esses parâmetros e os do ensaio direto ($V_{mín}$ e $t_{máx}$) é que agora estamos fazendo medições na entrada CA e não diretamente sobre o capacitor.

Obtenção da Curva de Decaimento vista pelo lado CA

Considerando-se que a curva de descarga, para um dado SED sob condições iniciais dadas seja única, é esperado que essa curva passe pelos dois pontos já conhecidos: o da condição inicial ($v(0) = V_n \cdot \sqrt{2}$) e de desligamento ($v(t_{\text{máx}_{CA}}) = V_{\text{mín}_{CA}}$).

Com base nisso pode-se programar afundamentos com tensões acima de $V_{\text{mín}_{CA}}$ com durações ajustáveis, seguidos de interrupções, para determinar pontos intermediários da curva de descarga. Enquanto os afundamentos permanecerem na região tolerável, a resposta do filtro não será alterada e $V_{\text{mín}_{CA}}$ será alcançada sempre com o mesmo $t_{\text{máx}_{CA}}$.

Aumentando-se gradualmente a duração do afundamento, o limite da região de afundamento tolerável será ultrapassado quando o tempo de desligamento resultante começa a aumentar. Isso ocorre porque no limite da região de afundamento tolerável a tensão da entrada volta a ser maior que a tensão no filtro capacitivo e o diodo retificador entra em condução, mantendo o capacitor parcialmente carregado até que ocorra a interrupção. Nesse instante inicia-se uma nova curva de descarga, postergando o tempo de desligamento.

Essa sequência é ilustrada nas Figura 4.16 (a), (b) e (c). Nessa figura a queda de tensão sobre os diodos foi desprezada. À medida que a duração do afundamento vai aumentando, nota-se que a curva de descarga só passa a ser afetada a partir do momento que a amplitude da tensão imposta pela entrada se torna maior que a tensão sobre o capacitor do filtro $v_C(t)$.

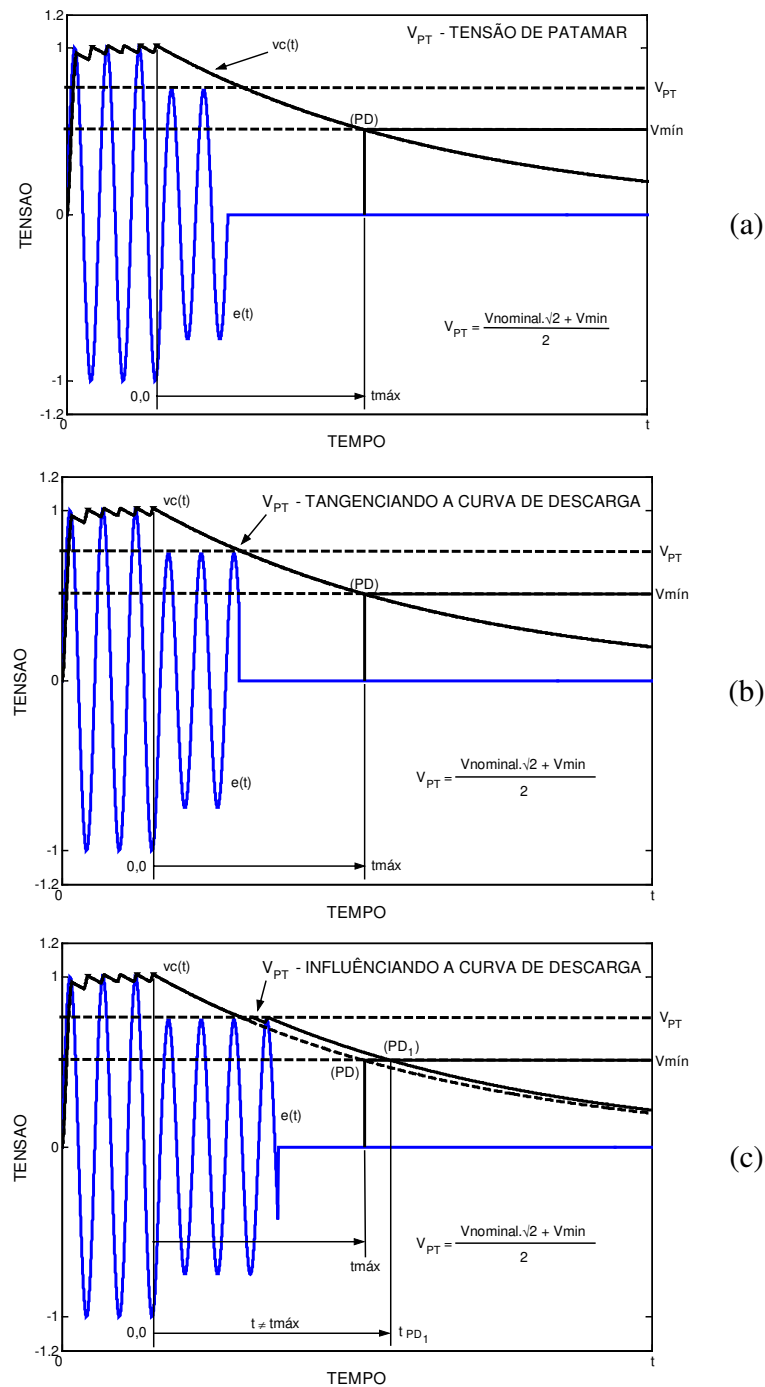


Figura 4.16 - Eventos Usados para Determinação da Curva de Decaimento:

- (a) Evento na região de afundamento tolerável (não afeta o ponto PD)
- (b) Evento no limite da região tolerável (tangencia a curva de decaimento)
- (c) Evento que retarda o ponto de desligamento.

O procedimento é repetido para diferentes níveis de afundamento na faixa “ $V_{mín_{CA}} < V_{PT} < V_n$ ” e assim são coletados os pontos intermediários da curva de descarga, vista pela entrada CA da carga.

$V_{mín_{CA}}$, $t_{máx_{CA}}$ e a curva de decaimento permitem, portanto, descrever a curva limite de tolerância para afundamentos pelo lado da rede. Essa é a característica que se buscava para poder avaliar o impacto que um evento impõe sobre uma dada classe de cargas sensíveis. Além de mostrar quais os parâmetros importantes, foi mostrado também como obtê-los de forma direta e indireta.

4.4 Indicador de Impacto de VTCD em Cargas Sensíveis (Resposta do Filtro Capacitivo)

Conhecidas as curvas limite de tolerância de uma carga sensível a afundamentos e elevações da tensão, pode-se afirmar com maior grau de certeza se o mau funcionamento ou a queima de um equipamento está ou não relacionado com um evento observado na rede.

A idéia é expressar o efeito através de um indicador que, baseado na evolução temporal da curva de resposta do filtro capacitivo, seja capaz de fazer o simples diagnóstico: causa / não causa impacto.

Inicialmente será descrito um indicador para cargas de mesmos limites de tolerância, depois será considerado um sistema mais complexo, contendo cargas com diferentes características e, finalmente, a comparação com as condições normativas.

4.4.1 Indicador de Impacto de VTCD para Micro-Sistemas

Por micro-sistema entenda-se um sistema composto por uma única carga sensível ou um conjunto de cargas com limites iguais de tolerância suprida a partir do mesmo alimentador, ou seja, será proposto um indicador para avaliação de impacto de VTCD que leva em conta o tipo de carga sensível. Mais adiante será apresentado indicador para diferentes tipos de cargas sensíveis.

Na Figura 4.17 é apresentado um exemplo de aplicação para um afundamento e uma elevação de tensão, supondo conhecidas as curvas de tolerância de um equipamento qualquer.

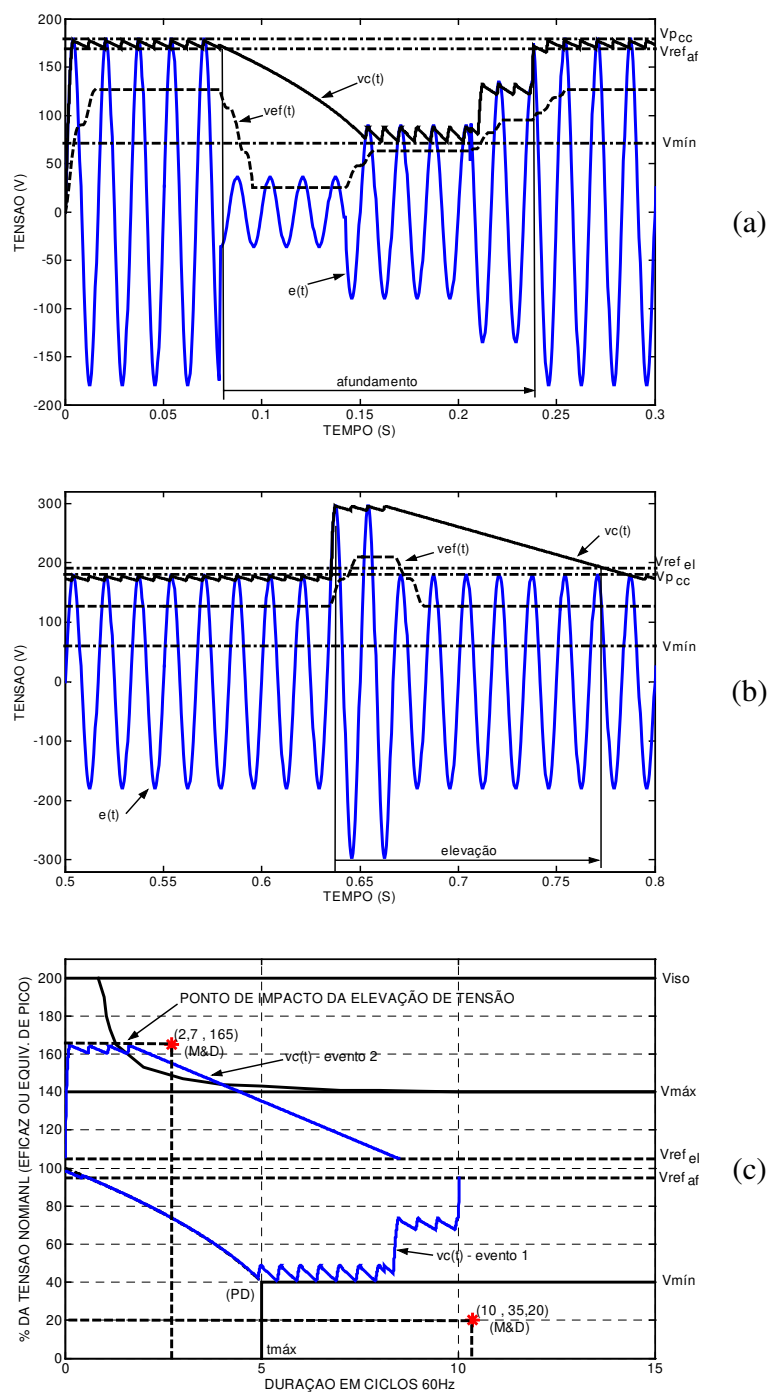


Figura 4.17 - Comparação entre os Parâmetros de M&D e os Limites de Tolerância.

- (a) Afundamento de tensão que não teria impacto sobre a carga;
- (b) Elevação de tensão que teria impacto sobre a carga;
- (c) Comparação das curvas de tolerância com a metodologia da M&D.

Na Figura 4.17(a), o afundamento seria classificado como de 20% de magnitude e 10,35 ciclos de duração, sugerindo um impacto significativo sobre a carga, baseando-se na metodologia da magnitude e duração do evento (M&D). Pela resposta da carga, no entanto, esse evento não causaria impacto, como mostrado na Figura 4.17(c).

Na Figura 4.17(b), a magnitude da elevação de tensão seria de 165% com duração de 2,7 ciclos, quando na realidade a curva do filtro capacitivo mostra que a sobretensão durou aproximadamente 9 ciclos, ou seja, o impacto foi muito maior do que prevê o método da M&D. Nos dois casos um indicador baseado nas curvas de tolerância da carga classificaria o evento com maior precisão que o método da M&D.

Os exemplos apresentados mostram que, para decidir se um afundamento causa ou não desligamento, basta verificar *se a curva de decaimento cai abaixo de $V_{min_{CA}}$ no lado CA ($V_{mín}$ no lado CC)*. Para decidir se uma elevação é ou não suportada pela carga, basta verificar *se a curva de decaimento invade ou não a região de dano*.

Colocados desta forma, os critérios de violação estão relacionados mais com as características das cargas do que com os limites previstos pelas Normas vigentes. Essa questão será abordada mais adiante.

4.4.2 Indicadores de Impacto para Macro-Sistemas

Por macro-sistema entenda-se um sistema composto de duas ou mais cargas sensíveis, de limites de tolerância diferentes, supridas pelo mesmo sistema de alimentação. Exemplo de macro-sistemas são: plantas e processo industriais, sistema relacionados à tecnologia de informação (TI), sistemas bancários, etc. Na Figura 4.18, é mostrado um exemplo de macro-sistema.

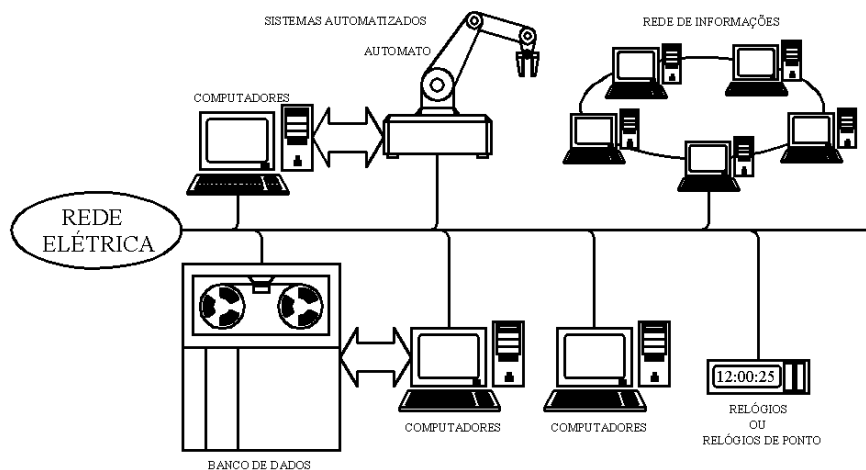


Figura 4.18 – Macro-sistema com Múltiplas Cargas Sensíveis.

Neste caso tem-se diferentes curvas de tolerância, associadas aos vários equipamentos. Independente das curvas de descargas, o equipamento mais sensível a afundamentos de tensão é o que apresenta o menor $tm_{\acute{a}x}$. Isto porque é o dispositivo que dissipa a energia armazenada mais rapidamente, portanto deverá ser o primeiro a alcançar o seu limite da tensão $V_{m\grave{i}n}$. O segundo equipamento mais sensível é o que apresenta o segundo menor $tm_{\acute{a}x}$, e assim por diante. Portanto, a curva limite a afundamentos do macro-sistema pode ser aproximada pela composição das curvas de tolerância dos equipamentos mais sensíveis (com menores valores de $tm_{\acute{a}x}$).

De forma similar, para distúrbios com elevação de tensão, o equipamento mais sensível é o que apresenta curva de dano mais à esquerda, ou seja, o que suporta elevações de tensão por menos tempo. A curva limite a elevações de tensão resultante é uma composição das características dos equipamentos mais sensíveis do macro-sistema. No caso de surtos, o limite superior é definido pelo menor valor V_{iso} entre os equipamentos do macro-sistema.

Na Figura 4.19 (c), (d) e (e) é exemplificado um sistema composto por três cargas sensíveis, designados por equipamentos “Eq₁”, “Eq₂” e “Eq₃”, e suas respectivas curvas de tolerância a afundamentos “CA₁”, “CA₂” e “CA₃” e a elevações “CE₁”, “CE₂” e “CE₃”. A curva de tolerância do macro-sistema é definida pelas curvas “CEM”, para elevações, e a curva “CAM”, para afundamentos, Figura 4.19 (f).

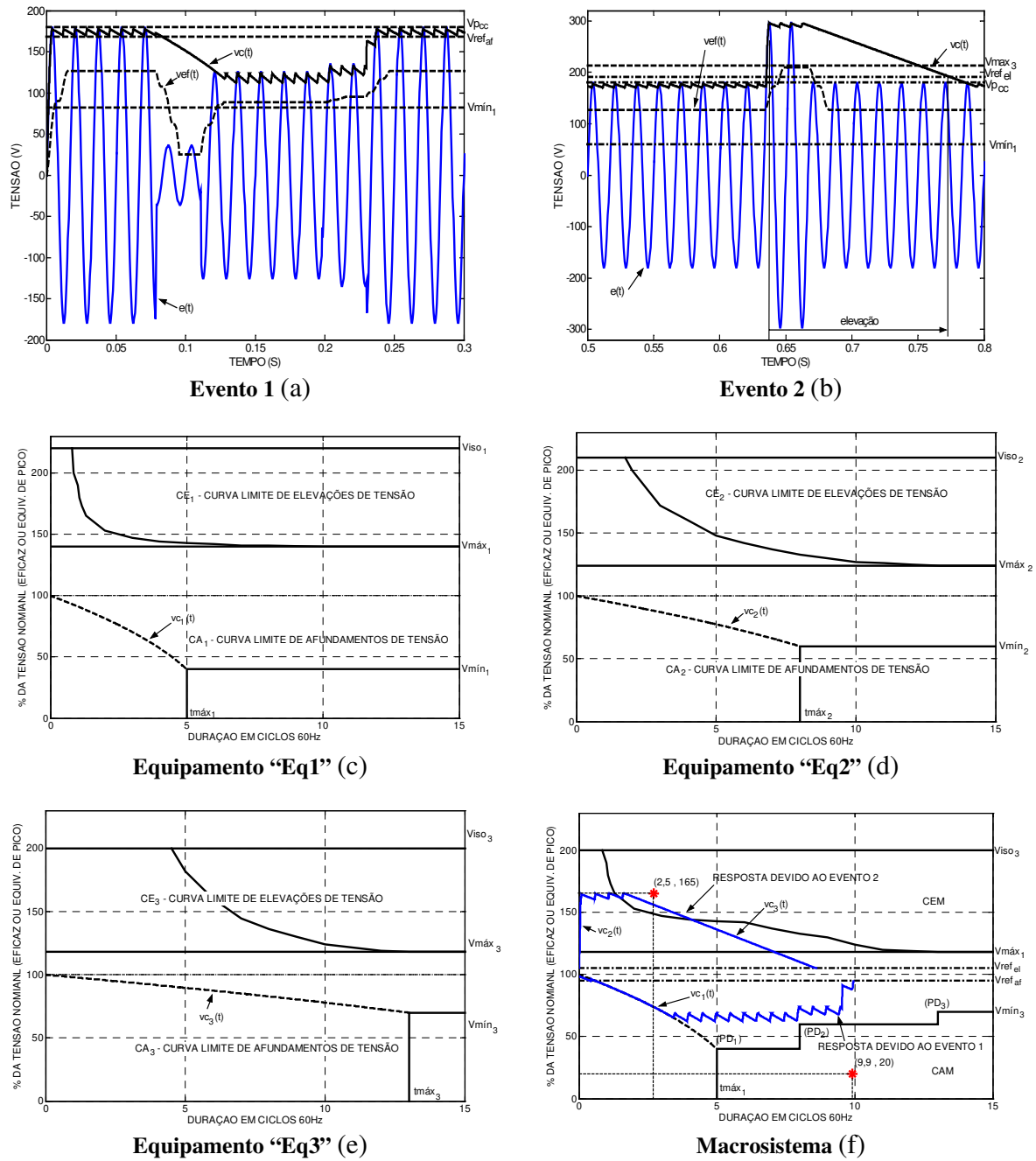


Figura 4.19 – Limite de Tolerância de Macro-sistema Composto de 3 Cargas Sensíveis a VTCDs.

- (a) Evento 1 – afundamento de tensão
- (b) Evento 2 – elevação de tensão
- (c) Curvas de Tolerância do Equipamento 1 – “Eq1”
- (d) Curvas de Tolerância do Equipamento 2 – “Eq2”
- (e) Curvas de Tolerância do Equipamento 3 – “Eq3”
- (f) Curvas de Tolerância do Macro sistema

O exemplo evidencia a necessidade de se conhecer as curvas de tolerância das cargas mais sensíveis para estabelecer limites aplicáveis a um conjunto qualquer de cargas alimentadas pela rede. Isso implica em:

- identificar as cargas mais sensíveis;
- obter as suas curvas de tolerância a afundamentos e elevações de tensão;
- fazer uma composição das curvas mais críticas.

Como no caso de micro-sistema, o critério de decisão para o indicador se basearia na violação ou não dos limites de tolerância resultantes para o macro-sistema.

4.5 Comparação entre Curvas de Tolerância e Curvas Normativas

Como já discutido no capítulo 2, as normas internacionais preconizam basicamente duas curvas de tolerância para a avaliação do impacto de afundamentos e elevações de tensão: a curva CBEMA/ITIC aplicável na indústria de equipamentos utilizando tecnologia de informação e a curva SEMI, utilizada pela indústria de componentes semicondutores, submetidas a afundamentos e elevações de tensão retangulares.

Em geral a verificação de atendimento a essas normas baseia-se na metodologia da M&D. Como já descrito no capítulo 2, entende-se por Magnitude o máximo valor da violação (afundamento ou elevação) e por duração o tempo total (em ciclos) que a tensão permaneceu fora da faixa de valores toleráveis em regime permanente.

Comparando-se as curvas ITIC com as do macro-sistema genérico, percebe-se que apresentam semelhanças de forma. Essas semelhanças provavelmente não são coincidência se considerarmos que a ITIC foi proposta para ser aplicada a qualquer tipo de carga usada no setor de processamento da informação (informática e telecomunicações). Quando ligados à rede, tais equipamentos utilizam fontes CC, que foram objeto de estudo desta pesquisa.

A diferença é que as curvas correspondentes aos limites de tolerância referem-se a uma dada condição de operação das cargas ensaiadas, frente a variações de tensão da alimentação, enquanto que as curvas normativas expressam os limites recomendados para uma dada classe de cargas operando nas condições definidas pela norma.

A comparação dessas curvas, portanto, sob condições de operação similares, permite saber qual a “folga” que os equipamentos do macro-sistema apresentam em relação aos limites recomendados.

Nessas condições, superpondo-se as curvas de tolerância das cargas e as da norma, essas diferenças podem ser analisadas sob diferentes pontos de vista:

1. **Ponto de vista do fabricante:** pode verificar se o seu equipamento atende ou não à norma vigente. Através dos modelos propostos o fabricante pode mudar o seu projeto, de forma que venha a atender aos limites previstos pela norma, com menores custos;
2. **Ponto de vista da concessionária:** pode verificar se os procedimentos utilizados e relativos a VTCDs são adequados, considerando os limites de tolerância dos equipamentos disponíveis no mercado;
3. **Ponto de vista do legislador:** pode verificar a necessidade de alterar os limites normativos referentes a VTCDs tanto em função do avanço tecnológico de fabricantes como da melhoria dos serviços das concessionárias, visando sempre garantir os interesses dos consumidores.
4. **Ponto de vista do consumidor:** pode verificar se um determinado impacto em sua carga foi ou não causado por um evento na rede, com vista a ressarcimento de prejuízos.

Na curva CBEMA/ITIC, Figura 4.20, pode-se observar a superposição dos limites de interrupções, afundamentos e elevações de tensão com os limites de um equipamento eletrônico testado e que será apresentado no Capítulo 5.

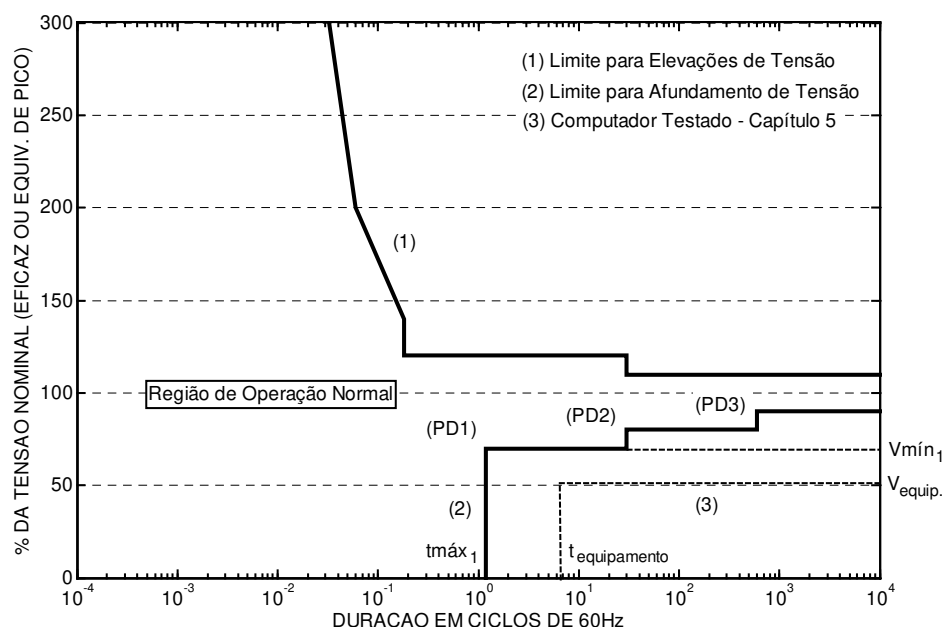


Figura 4.20 - CBEMA/ITIC – Limites de Equipamento de Tecnologia de Informação e Comparação com Computador Testado – Capítulo 5.

Analisando-se a Figura 4.20 pelo impacto causado por afundamentos de tensão do ponto de vista dos fabricantes, pode-se afirmar que qualquer equipamentos que tenha seus limites, curva (3) no gráfico, abaixo dos limites normativos ($t_{\text{equipamento}} > t_{\text{máx}_1}$) e ($V_{\text{equipamento}} < V_{\text{mín}_1}$) atende às condições da norma, e quanto mais folga em relação a esses limites, mais robusto o equipamento frente a distúrbios de afundamento de tensão.

Do ponto de vista das concessionárias torna-se necessário obter dados dos eventos mais comuns, tais como: incidência de curto-circuito, falha de equipamentos, distúrbios causados por manobras, surtos de tensão, descargas atmosféricas, etc. Com base nesses dados históricos poderiam ser elaboradas curvas de impactos máximos aceitáveis em termos de interrupções, afundamentos e elevações de tensão.

Neste contexto encontra-se o consumidor de equipamentos eletrônicos e ao mesmo tempo de energia elétrica. O interesse do mesmo é justamente encontrar um equipamento altamente robusto a distúrbios de VTCD e um fornecimento de energia elétrica confiável com baixo índice de ocorrência de distúrbios e de baixa severidade.

Baseando-se nas necessidades dos três agentes envolvidos (fabricantes de equipamentos eletrônicos, concessionária de energia elétrica e consumidores) seria razoável definir dois limites, um para as concessionárias e outro para fabricantes de equipamentos eletrônicos, como sugerido na Figura 4.21.

O limite para concessionárias deve-se apoiar em estudo do sistema elétrico, caracterização dos eventos, suas causas mais comuns, índice de ocorrência e ainda levar em consideração o estudo das cargas envolvidas, que neste trabalho constituem-se de equipamentos eletrônicos alimentados por fontes CC.

As considerações feitas neste item são aplicáveis ao estudo de elevações de tensão e também a outros limites de tolerância como, por exemplo, a curva SEMI F47.

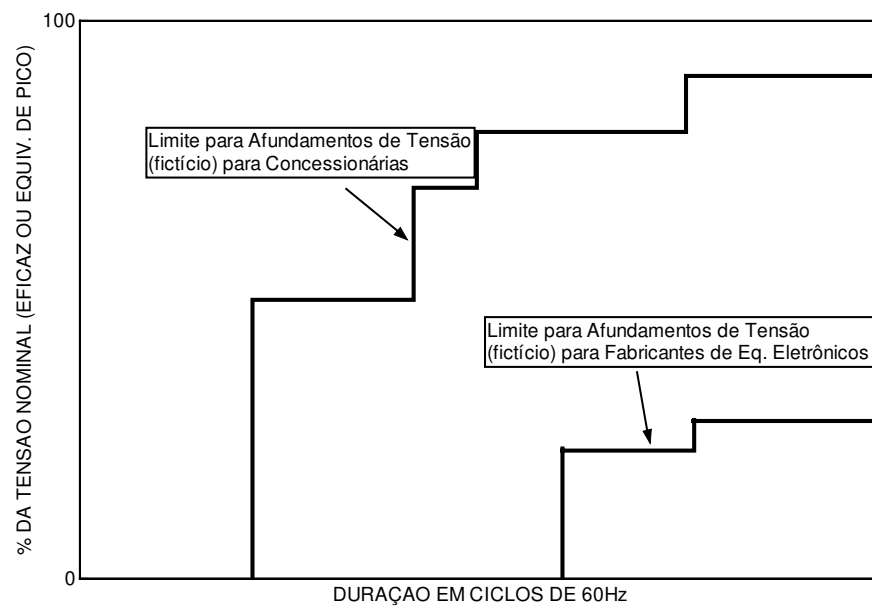


Figura 4.21 – Sugestão de Limites de Tolerância à Afundamentos de Tensão para Concessionárias e Fabricantes.

4.6 Validação do Modelo Sob Nova Condição de Operação

Um importante teste de validação da metodologia proposta, consiste em obter os parâmetros do equipamento eletrônico sob condições de operação distintas das usadas para extração do modelo inicial. Se o modelo apresentado é geral, então se for alterado um dos parâmetros dos modelos proposto deve ser possível encontrar a nova condição de operação, e com isto ficaria demonstrada a condição geral para os modelos apresentados.

A maneira mais simples de se realizar tal validação é atuar sobre o elemento que está relacionado diretamente com a dinâmica $v_C(t)$, ou seja, alterar o valor do filtro capacitivo (capacitor).

O teste consiste no seguinte procedimento:

1. Para a condição de operação testada inicialmente, calcular, através dos modelos propostos, qual seria o valor do capacitor que atenderia um novo limite de tolerância, um ponto de desligamento distinto da condição inicial de teste.
2. Então seria substituído o capacitor (filtro capacitivo) na fonte CC por um com valor próximo, ao calculado para o novo ponto de desligamento (novo limite de tolerância).
3. Simulações e ensaios são realizados para a nova dinâmica de $v_C(t)$ de modo a verificar a nova resposta crítica prevista através dos modelos.

Para melhor compreensão considere que são conhecidos as condições de operação e os limites de tolerância de um equipamento através de ensaios e que seus parâmetros são definido por: curva de descarga em potência constante (P_{C1}), com um limite de tensão mínima ($V_{mín_1}$), um limite de duração máxima ($tmáx_1$) e valor do filtro capacitivo de (C_1). Assim, para este equipamento tem-se um ponto único e específico de desligamento (PD_1).

Para uma nova condição, supõe-se um ponto de desligamento desejado (PD_{novo}), que define um outro limite de duração máxima ($tmáx_{novo}$) distinto da condição inicial. Considerando-se os mesmos valores de potência constante (P_{C1}) e limite de tensão mínima ($V_{mín_1}$) é possível encontrar o novo valor para o filtro capacitivo (C_{novo}), definido pela equação (4.9).

$$C_{novo} = \frac{2 \cdot P_{C1} \cdot tmáx_{novo}}{V_O^2 - V_{mín_1}^2} \quad (4.9)$$

Substituindo o antigo capacitor C_1 pelo valor igual ou próximo de C_{novo} , novos ensaios são realizados com o objetivo de verificar a nova condição de operação e encontrar o ponto desligamento (PD_{novo}) na condição esperada. A Figura 4.22 mostra graficamente como é a

validação do modelo pela nova condição de operação em um ponto de desligamento pré-determinado.

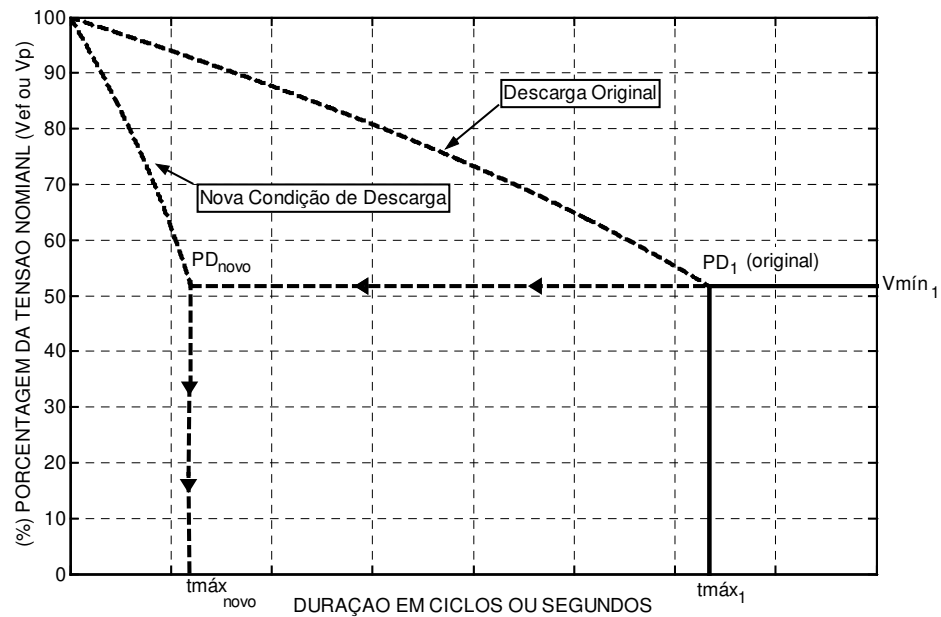


Figura 4.22 – Nova Condição do Ponto de Desligamento para Validação dos Modelos

No Capítulo 5 serão realizados testes em cargas reais em condições de operação distintas das fornecidas pelos fabricantes, com base nesta idéia.

Capítulo 5

Ensaio em Cargas Eletrônicas Alimentadas Através de Fontes CC.

De forma resumida, os três capítulos anteriores tinham como objetivos:

Capítulo 2 – Apresentar as normas aplicadas a VTCD, metodologia de caracterização, classificação e verificação de impacto sobre cargas.

Capítulo 3 - Apresentação de modelos que representassem o comportamento de uma família de cargas, equipamentos eletrônicos alimentados por fontes CC, frente a VTCD.

Capítulo 4 – Com base no apresentado no capítulo 3, definiu-se os parâmetros fundamentais de um equipamento eletrônico frente VTCDs, apresentou-se metodologias de medição e extração de tais parâmetros, e foi proposto um indicador (Resposta do Filtro Capacitivo) baseado nas características dessa família de cargas.

Assim, o capítulo 5 tem como objetivo validar os modelos, as definições e as metodologias de medição e extração de parâmetros apresentados nos capítulos 3 e 4, e confrontar o indicador proposto baseado no comportamento das cargas, com as normas atuais.

Para tais validações, ensaios, testes e comparações, serão realizados da seguinte maneira:

1. Ensaios são feitos para extração dos parâmetros que permitam construir os modelos das cargas eletrônicas testadas frente a VTCD.
2. Os modelos obtidos e as cargas eletrônicas em teste são então submetidos aos mesmos distúrbios de VTCD gerados por uma fonte CA programável (gerador de ondas arbitrárias da Califórnia Instruments). A resposta simulada dos modelos é comparada com a resposta real das cargas eletrônicas testadas.
3. Para validação dos modelos é feita uma readequação das cargas eletrônicas para uma nova condição de operação distinta da original (definida pelo fabricante). Essa nova condição é testada de modo a se observar a nova resposta do filtro capacitivo e comparar com a resposta esperada.

Para essa validação foram escolhidos 3 equipamentos eletrônicos, disponíveis:

- **Rádio Relógio – modelo: RR-714 – fabricante: Lenoxx Sound.**

Equipamento doméstico de baixo custo, construção simples, ampla difusão, representa equipamentos eletrônicos com fonte CC linear.

- **Televisor 14” – modelo: - fabricante: Philips.**

Equipamento doméstico de ampla difusão encontrado também no meio residencial, equipamento alimentado por fonte CC chaveada.

- **Microcomputador – modelo: PC montado – sem marca.**

Configurações: processador - Pentium MMX 200MHz, memória RAM - 64 kbytes, 2 discos rígidos – 3 e 4 Gbytes, 1 unidade de disco flexível 1,44 Mbytes, 1 unidade de cd-rom 32x, monitor de 14” e sistema operacional Windows 95. Equipamento encontrado nos meios doméstico, comerciais e industriais, ampla difusão, equipamento alimentado por fonte CC chaveada.

A composição laboratorial para realização dos ensaios nos equipamentos acima descritos foi:

- 1 osciloscópio digital, modelo TDS 430 A, fabricante Tektronix, 2 canais, 400 MHz, 100 MS/s e unidade de disco flexível.
- 1 gerador CA trifásico programável de ondas arbitrárias: modelo 4500iL, fabricante California Instruments, 4,5 kVA, 300V/5A, 150V/10A.
- 1 Ponteira diferencial, modelo P5200, fabricante Tektronix, 1300V/130V.
- 1 Ponteira de corrente, modelo A6302 e 1 módulo de amplificação para ponteira de corrente, modelo AM 503B, fabricante de ambos Tektronix.
- 1 multímetro digital, modelo ET-2700, fabricante Minipa.
- 1 multímetro digital, modelo DMM249, fabricante Tektronix.
- Fonte CC, modelo 6030 A, fabricante: Hewlett Packard, 200V – 17A, 1000 W.

A bancada para ensaio dos 3 equipamentos citados é mostrada na Figura 5.1. O equipamento em teste no caso desta figura é o rádio relógio.



Figura 5.1 - Bancada para Ensaio dos Equipamentos.

Importante lembrar que para os ensaios de elevação de tensão nos equipamentos citados foram aplicados distúrbios de baixa amplitude para assim evitar danos aos mesmos, disto também decorre o não conhecimento da curva de tolerância a elevações de tensão. A finalidade destes testes é de observar a curva de resposta $v_c(t)$ do equipamento frente a elevações de tensão.

5.1 Rádio Relógio – Lenox Sound.



Figura 5.2 - Rádio Relógio Lenox Sound.

O rádio relógio é alimentado por fonte CC linear, para tensão nominal de 127V ou 220V e apresenta 2 modos de operação:

- **Ajuste:** Display em funcionamento piscante, indicando que o relógio precisa ser ajustado.
- **Normal:** Displays em funcionamento contínuo (não piscante), com as horas e minutos ajustados.

Da aplicação de uma VTCD, afundamento de tensão, tem-se duas observações possíveis:

- **Não Causa Impacto:** após aplicação da VTCD, o rádio relógio continua operando normalmente, mantém o modo de “operação normal”.
- **Causa Impacto:** após aplicação da VTCD, o rádio relógio entra em modo de “ajuste” (displays piscantes), indicando perda parcial ou total de informação.

5.1.1 Extração de Parâmetros e Modelos do Rádio Relógio.

Parametrização de Forma Direta ou Invasiva.

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados no rádio relógio conforme descrito no capítulo 4, item 4.3.1, com o objetivo de extrair os parâmetros do transformador de entrada, o equivalente do estágio de retificação e o valor do filtro capacitivo.

Tabela 5.1 - Parâmetros Obtidos para o Rádio Relógio Lenox Sound

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
V_1	Tensão no primário do transformador	medição	127,5 V
V_2	Tensão no secundário do transformador	medição	21,24 V
a	Relação de transformação	calculado	6,002
ct	Derivação de center-tap $(V_1/V_2)_{ct}$	medição	11,98
V_{1cc}	Tensão no primário do transformador com secundário em curto circuito	medição	43,0 V
I_{1cc}	Corrente no primário do transformador com secundário em curto circuito	medição	35,36 mA
I_{2cc}	Corrente no secundário do transformador com secundário em curto circuito	medição	199,7 mA
ϕ_1	Defasagem angular entre V_{1cc} e I_{1cc} ($f = 60$ Hz)	medição	7,21°
R_1	Resistência do primário	medição	497 Ω
R_2	Resistência do secundário	calculado	19,694 Ω
Req_1	Resistência equivalente do transformador referido ao primário	calculado	1206,44 Ω
Req_2	Resistência equivalente do transformador referido ao secundário	calculado	33,49 Ω
Xeq_1	Reatância equivalente do transformador referido ao primário, considerando $X_1 = a^2 \cdot X_2$	calculado	152,62 Ω
Xeq	Reatância equivalente do transformador referido ao secundário, equivalente a Xeq_2	calculado	4,236 Ω
Leq	Indutância equivalente do transformador referido ao secundário, equivalente a Leq_2	calculado	11,237 mH
C	Capacitor, estágio do filtro capacitivo	inspeção	220 μF
r_D	Resistência interna do diodo (considerado desprezível)	*****	0,1 Ω
v_D	Tensão de polarização do diodo	medição	0,9 V

Baseando-se na Figura 5.3, Tabela 5.1 e nos procedimentos descritos no capítulo 4, item 4.3.1, são extraído os limites de tolerância do rádio relógio ($V_{mín}$, $t_{máx}$, curva de descarga) e os valores dos equivalentes do SED (I_c , R_{trans} , R), mostrados na Tabela 5.2.

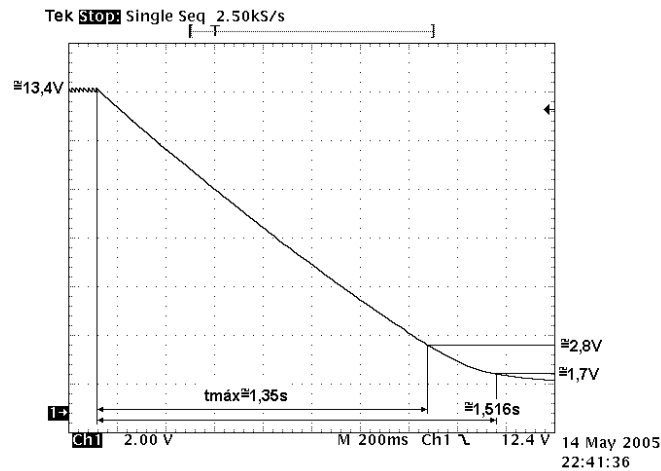


Figura 5.3 – $v_c(t)$ Devido a uma Interrupção - Extração dos Limites de Tolerância do Rádio Relógio.

Uma particularidade na curva de impedância constante é que a mesma apresenta dois modelos, que serão diferenciados por “ R_{trans} ” resistência de transição de impedância constante e “ R ” resistência equivalente para modelo de impedância constante.

Tabela 5.2 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Direta)

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
$t_{máx}$	Limite de tempo máximo	medição	$\cong 1,35s$
$V_{mín}$	Limite de tensão mínima	medição	$\cong 2,8V$
I_c	Equivalente do bipolo de corrente constante	calculado	1,7458 mA
R_{trans}	Equivalente de impedância constante, resistência de transição.	calculado	1851 Ω
R	Equivalente de impedância constante, resistência do bipolo de impedância constante.	calculado	7900 Ω

Na Figura 5.4 pode-se observar os limites de tolerância a afundamentos de tensão para o rádio relógio, baseada das medições realizadas e os parâmetros da Tabela 5.2.

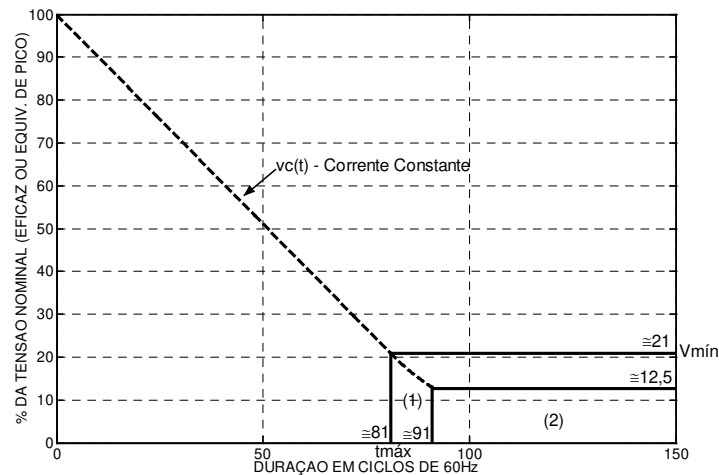


Figura 5.4 - Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão do Rádio Relógio (Forma Direta).

- (1) **Região de mau funcionamento:** os eventos nesta região causam impacto parcial no rádio relógio;
- (2) **Região de desligamento:** os eventos nesta região causam desligamento total do rádio relógio.

Construção do Modelo para o Rádio Relógio – Forma Direta.

Com todos os parâmetros obtidos, pode-se determinar as equações que representam o comportamento do filtro capacitivo do rádio relógio testado, porém um cuidado deve ser tomado em relação ao estágio de retificação: os modelos apresentados no capítulo 3 foram baseados em um retificador do tipo ponte de diodos, mas o retificador observado no rádio relógio é do tipo retificador monofásico de meia onda.

Na Figura 5.5 é mostrado o algoritmo que representa o funcionamento do retificador monofásico ideal e como este modifica a tensão de entrada $e(t)$.

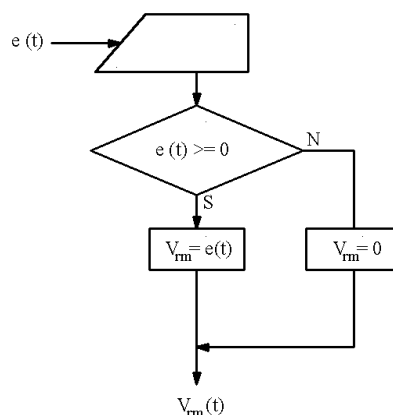


Figura 5.5 - Algoritmo que representa um Retificador Monofásico (Rádio Relógio).

As equações (5.1) e (5.2) representam a resposta de carga e equação (5.3) a resposta de descarga em corrente constante, essas baseadas nas equações (3.13), (3.16) e (3.22).

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{i_T(t)}{220 \cdot 10^{-6}} - 7,936 \quad (5.1)$$

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{v_{rm}(t)}{0,1346} - \frac{vc(t)}{11,36 \cdot 10^{-3}} - 80,09 - 2980,33 \cdot i_T(t) \quad (5.2)$$

$$\frac{dvc}{dt} = -7,936 \quad (5.3)$$

As equações (5.4) e (5.5) representam a resposta de carga e a equação (5.6) resposta de descarga para impedância constante R_{trans} , resistência de transição, baseadas nas equações (3.5), (3.8) e (3.12).

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{i_T(t)}{220 \cdot 10^{-6}} - \frac{vc(t)}{0,40722} \quad (5.4)$$

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{v_{rm}(t)}{0,1346} - \frac{vc(t)}{11,36 \cdot 10^{-3}} - 80,09 - 2980,33 \cdot i_T(t) \quad (5.5)$$

$$\frac{dvc}{dt} = -\frac{vc(t)}{0,40722} \quad (5.6)$$

As equações (5.7) e (5.8) são a resposta de carga e a equação (5.9) definem a resposta de descarga em impedância constante para resistência equivalente R , baseadas nas equações (3.5), (3.8) e (3.12).

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{i_T(t)}{220 \cdot 10^{-6}} - \frac{vc(t)}{1,738} \quad (5.7)$$

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{v_{rm}(t)}{0,1346} - \frac{vc(t)}{11,36 \cdot 10^{-3}} - 80,09 - 2980,33 \cdot i_T(t) \quad (5.8)$$

$$\frac{dvc}{dt} = -\frac{vc(t)}{1,738} \quad (5.9)$$

No rádio-relógio a alimentação do sistema mais crítico a VTCDs é o sistema dedicado ao funcionamento do circuito do relógio e este é alimentado pela derivação de center-tap (ct), por isso as equações mostradas que representam o modelo de resposta do rádio relógio são referenciadas com tal parâmetro.

Parametrização de Forma Indireta ou Não Invasiva.

Lembrando-se que a grande vantagem da Forma Indireta sobre a Forma Direta é a não necessidade de abrir o equipamento em teste, consegue-se retirar o valor de $V_{mín_{CA}}$, $t_{máx_{CA}}$ e a curva de descarga. A desvantagem desse método é não ter tanta precisão como a Forma Direta, não é possível retirar a resposta de carga e também não se consegue extrair os valores reais dos componentes que constituem a fonte CC.

Baseado nos procedimentos descritos no capítulo 4, item 4.3.2, extrai-se então os valores de $V_{mín}$, $t_{máx}$ e a curva de descarga do rádio relógio, conforme Tabela 5.3. Tensão de ensaio em 127V.

Tabela 5.3 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Indireta)

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
$t_{máx_{CA}}$	Limite de tempo máximo pelo lado CA	medição	$\cong 1,35s$
$V_{mín_{CA}}$	Limite de tensão mínima pelo lado CA, baseado no valor de pico da tensão de entrada	medição/calculado	$\cong 44,47V$
C	Valor do estágio do filtro capacitivo	adotado	$470 \mu F$
$I_{c_{CA}}$	Equivalente CA do bipolo de corrente constante	calculado	46,42 mA
$R_{trans_{CA}}$	Equivalente CA do bipolo de impedância constante	calculado	$969,9 \Omega$
R_{CA}	Equivalente CA do bipolo de impedância constante	calculado	$2751,2 \Omega$

Na Figura 5.6(a) é apresentada os limites de tolerância obtidos pela medição indireta.

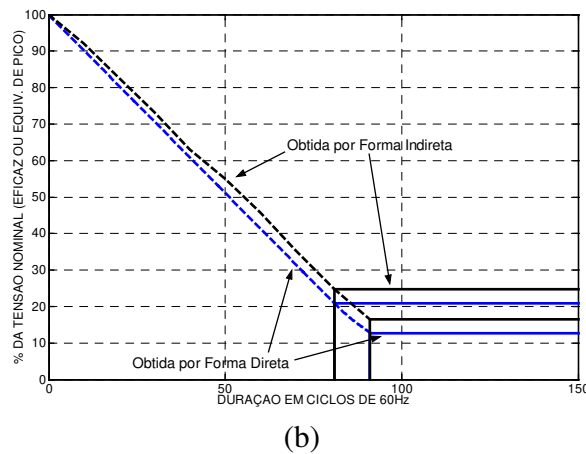
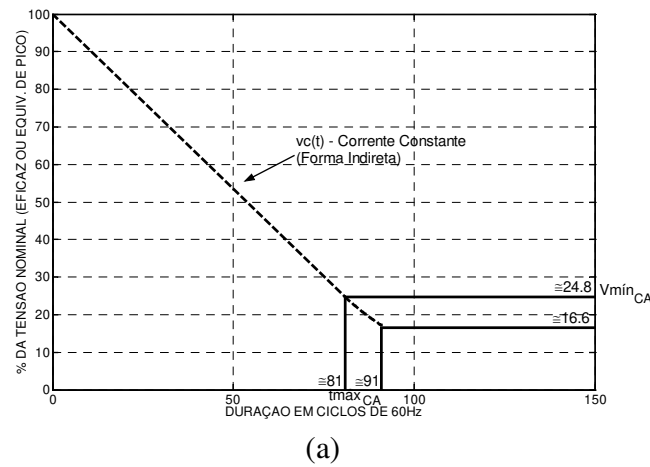


Figura 5.6 – Característica do Rádio Relógio Ensaiado:

- (a) Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão obtidos pelo lado CA;
- (b) Comparação entre os Limites Obtidos pela Forma Direta e Indireta.

Comparando-se, Figura 5.6(b), os limites de tolerância obtidos de Forma Direta e Indireta é possível perceber diferenças nos valores que referenciam o patamar de tensão mínima. A explicação para tal diferença é porque ao medirmos de forma direta estamos observando o próprio valor de $v_c(t)$, já na medição indireta temos um valor equivalente ao valor de $v_c(t)$ visto pelo lado CA, porém acrescido pela queda de tensão dos elementos série: indutância série do transformador L_{eq} , a tensão de polarização do estágio de retificação (v_D) e mais a resistência interna do estágio de retificação (r_D). Como já foi dito anteriormente esses parâmetros não podem ser extraídos pela Forma Indireta.

Construção do Modelo do Rádio Relógio – Forma Indireta.

Como pela Forma Indireta têm-se unicamente os parâmetros da Tabela 5.3, a construção do modelo equivalente do rádio relógio deve-se basear em considerações sobre os valores adotados. Pela Forma Indireta tem-se então um modelo que reagiria da mesma maneira que o rádio relógio, porém com configuração totalmente distinta.

Apesar de conhecidos os parâmetros do rádio relógio obtidos pela extração de Forma Direta, tais parâmetros serão considerados desconhecidos.

A seguir as considerações que serão utilizadas:

1. Sendo um rádio relógio de baixo custo e tendo-se a curva de descarga da Figura 5.6(a), a fonte CC é do tipo linear, ou seja, um SED de corrente constante.
2. Como não se tem acesso ao interior do equipamento o estágio de retificação será considerado de onda completa, ponte retificadora a diodos.
3. Não sendo possível determinar os parâmetros relacionados à resposta de carga: L_{eq} , v_D e r_D , pois depende das características de projeto de cada equipamento, será adotada uma postura conservadora, em que a resposta dinâmica rápida é a mais crítica, isso porque transitórios como surtos e elevações de tensão fariam com que a resposta do filtro capacitivo atingisse os valores máximos desses distúrbios. Portanto os parâmetros adotados serão valores ideais, somente a resistência interna do diodo não será ideal, mas desprezível, para evitar singularidade de uma fonte ideal em paralelo com capacitor.

Tabela 5.4 - Considerações para Resposta de Carga do Filtro Capacitivo (Forma Indireta)

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
a	Relação de transformação (transformador inexistente)	adotado	1,0
L_{eq}	Indutância equivalente do transformador de entrada referida ao secundário (transformador inexistente)	adotado	0,0 H
r_D	Resistência interna do diodo (considerado desprezível)	adotado	0,001 Ω
v_D	Tensão de polarização do diodo (considerado ideal)	adotado	0,0 V

4. Considerando um evento na região de desligamento, não existe maneira de se observar a resposta do filtro capacitivo, pois não se tem acesso ao interior do equipamento e como o equipamento em teste já sofreu impacto, está desligado, não há resposta visível externamente. Assim, não é possível determinar os modelos que representam a resposta de descarga em impedância constante na região de desligamento total (2), Figura 5.4.

As equações (5.10) e (5.11) definem a resposta em corrente constante ($I_{c_{CA}}$), baseadas na equação (3.22) e na Tabela 5.4.

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{a \cdot r_D \cdot C} - \frac{I_{c_{CA}}}{C} - \frac{vc(t)}{r_D \cdot C} \rightarrow \frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{0,47 \cdot 10^{-6}} - 90,26 - \frac{vc(t)}{0,47 \cdot 10^{-6}} \quad (5.10)$$

$$\frac{dvc}{dt} = -90,26 \quad (5.11)$$

As equações (5.12) e (5.13) definem a resposta em impedância constante ($R_{trans_{CA}}$), baseadas na equação (3.12) e na Tabela 5.4.

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{a \cdot r_D \cdot C} - \left(\frac{1}{R_{trans_{CA}} \cdot C} + \frac{1}{r_D \cdot C} \right) \cdot vc(t) \rightarrow \frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{0,47 \cdot 10^{-6}} - 2127,66 \cdot 10^{-3} vc(t) \quad (5.12)$$

$$\frac{dvc}{dt} = - \frac{vc(t)}{455,85 \cdot 10^{-3}} \quad (5.13)$$

Observa-se que os modelos que representam os SEDs ($I_{c_{CA}}$ e $R_{trans_{CA}}$) praticamente não tem nenhuma influência sobre a resposta de carga, percebe-se isso pelas equações (5.10) e (5.12), os coeficientes de $I_{c_{CA}}$ e $R_{trans_{CA}}$ são desprezíveis comparativamente com o coeficiente que multiplica $|e(t)|$.

5.1.2 Validação dos Modelos do Rádio Relógio (Forma Direta)

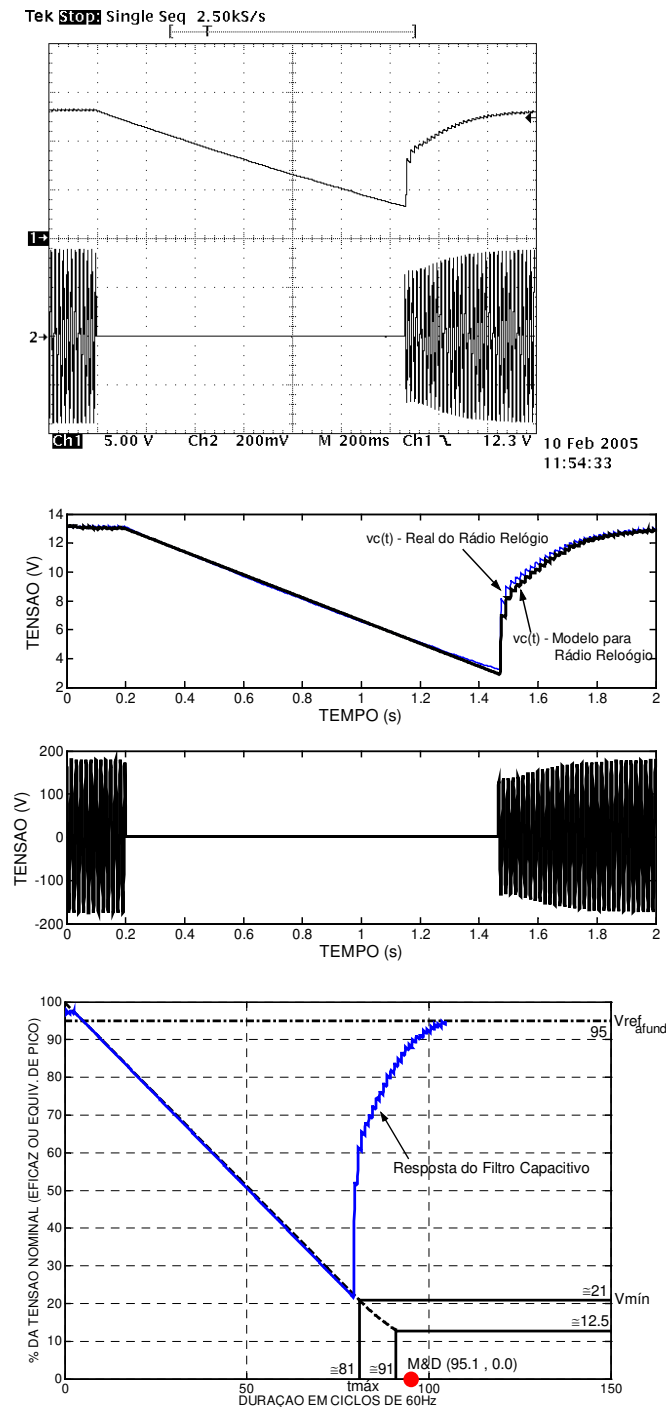
A seguir serão mostradas de forma comparativa a resposta real do rádio-relógio e a resposta dos modelos a eventos de VTCD programados pela fonte 4500 iL, gerador de ondas arbitrárias. Também será comparada a metodologia da M&D com o Indicador baseado na Resposta do Filtro Capacitivo.

Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{\text{máx}}$, Não Causa Impacto.

Na Figura 5.7 é apresentado um evento de interrupção em que o mesmo chega muito próximo ao valor de $t_{\text{máx}}$. Este evento não causou impacto no rádio relógio, que continua operando normalmente.

A resposta real do filtro capacitivo comparativamente com o modelo proposto demonstra a boa fidedignidade do mesmo, as diferenças são percebidas principalmente no momento em que a interrupção termina mudando para a condição normal de operação. Isto é devido a pobreza dos modelos para resposta de carga do filtro capacitivo.

Observe que a Resposta do Filtro Capacitivo demonstra com maior precisão o real impacto do evento sobre o rádio relógio. A metodologia da M&D indica que houve possibilidade de impacto sobre a carga invadindo a região de desligamento com as coordenadas, magnitude = 0,0 % e duração $\cong 95,1$ ciclos, já Resposta do Filtro Capacitivo chegou próximo do ponto de desligamento (PD), mas não invadiu a região de crítica, indicando que não houve impacto sobre o rádio relógio.



(a) Ensaio real:
Descarga do Capacitor do
Rádio Relógio e o Evento de
Interrupção Tangenciando
 $tm_{\max}$.
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
200mV/div $\rightarrow$ 100V/div

(b) Simulação de:
 $v_c(t)$ do Modelo em
Comparação com $v_c(t)$ Real
para a Interrupção.

(c) Comparação entre Resposta
do Filtro Capacitivo e M&D

Figura 5.7 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Interrupção Tangenciado $tm_{\max}$.

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$, Não Causa Impacto

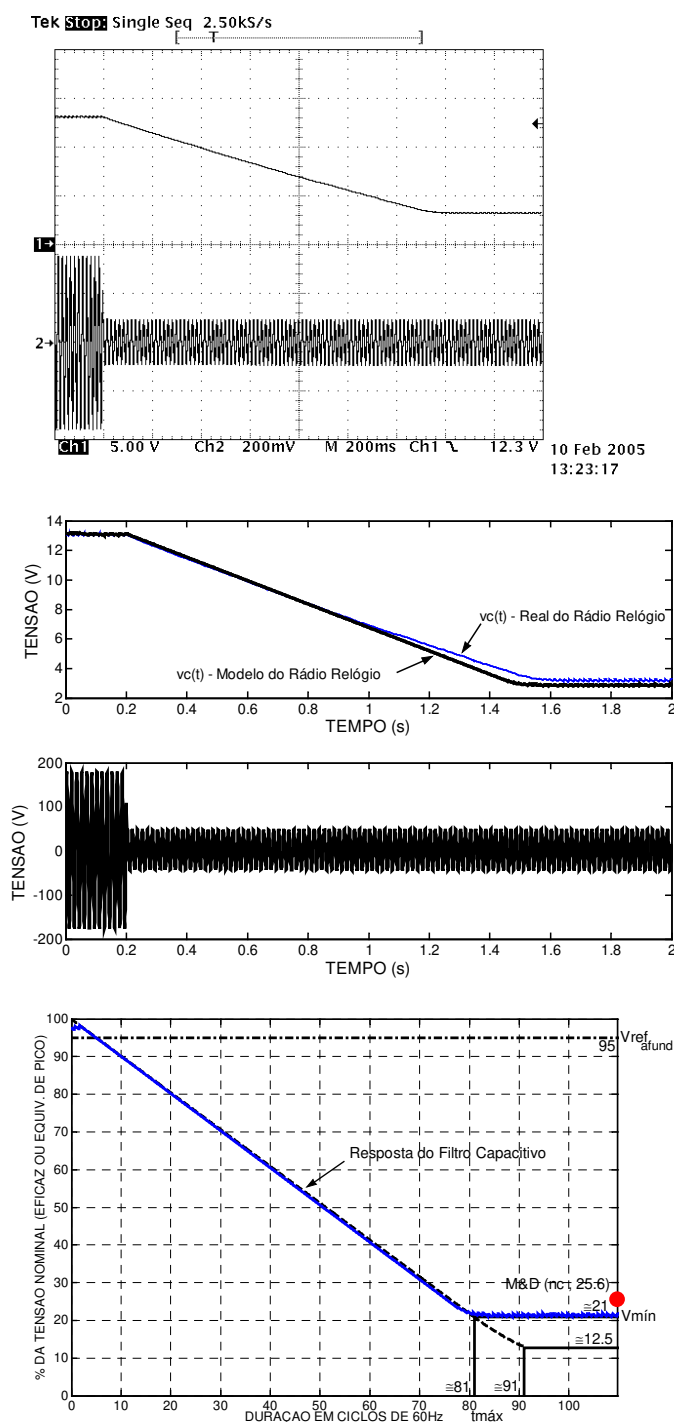


Figura 5.8 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$.

Na Figura 5.8 é mostrado um evento que passa um pouco acima de $V_{\min}$ e também não causa impacto sobre o rádio relógio.

A Figura 5.8(b) mostra que a resposta do modelo é muito próxima da resposta real do rádio relógio. A diferença observada na curva de descaimento de tensão do filtro capacitivo até o próximo ao nível de $V_{mín}$, entre o modelo e da resposta real, provavelmente está relacionada a dinâmica do rádio relógio que não é constante.

Em ambas as metodologias, M&D e Resposta do Filtro Capacitivo, o evento seria considerado como não causador de impacto sobre o rádio relógio, Figura 5.8(c). Apesar do evento capturado pelo osciloscópio ter duração limitada, este evento teve duração muito superior à mostrada, durando aproximadamente 1 minuto. Então no gráfico (c) onde é visto “nc” pode ser entendido como “n” ciclos, ou seja, poderia durar indefinidamente que não desligaria o rádio relógio.

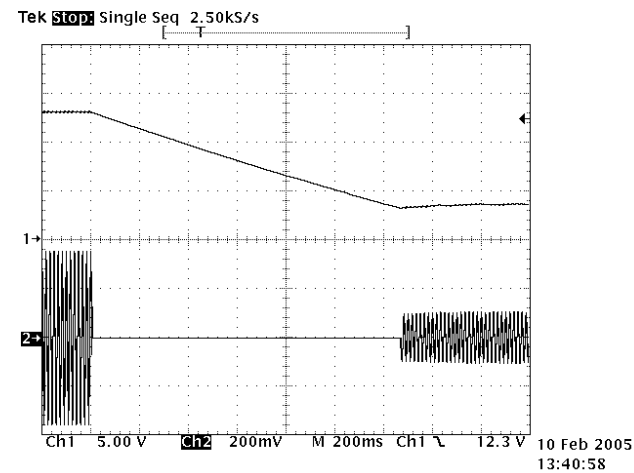
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{máx}$ e $V_{mín}$, Não Causa Impacto.

Outro evento gerado que não causa impacto no rádio relógio é o apresentado na Figura 5.9.

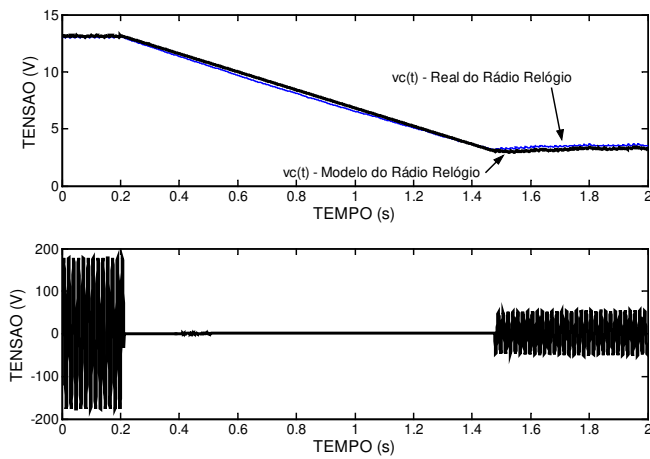
Na Figura 5.9(c) como na Figura 5.8(c) o valor descrito como “nc” (n ciclos) indica que o evento poderia perdurar indefinidamente que não afetaria o rádio relógio, no caso o teste foi realizado com $nc = 1$ minuto.

A principal característica desse evento pelo ponto de vista da metodologia da M&D é que seria avaliado como extremamente grave (alta severidade – alta possibilidade de causar impacto – interrupção de duração indefinida) o que não representa a realidade, pois não afeta o rádio relógio. Eventos em que o perfil é similar ao mostrado na Figura 5.9 demonstram a deficiência da M&D. O erro de avaliação é sério, mostrando a não confiabilidade da metodologia para eventos que não são retangulares.

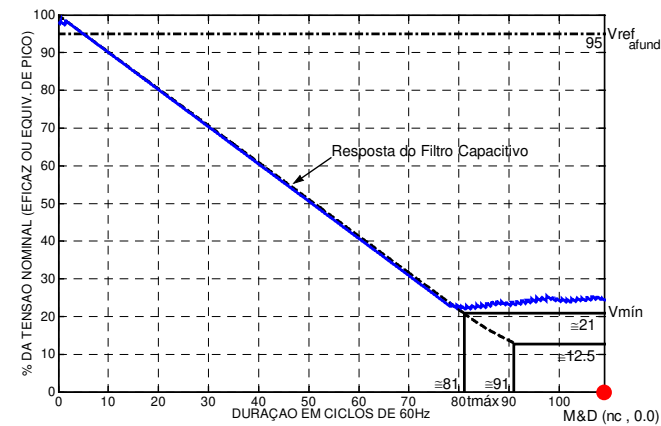
E novamente é possível verificar que a metodologia do Filtro Capacitivo demonstra de forma mais realista o verdadeiro impacto sobre o rádio relógio, onde é perceptível que o evento não causaria impacto sobre o rádio relógio. O modelo utilizado apresenta resposta muito próxima à verificada no real.



(a) Ensaio real:
Descarga do Capacitor do
Rádio Relógio e o Evento
Tangenciando os Limites de
Tolerância $V_{mín}$ e $t_{máx}$.
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
200mV/div $\rightarrow$ 100V/div



(b) Simulação de:
 $vc(t)$ do Modelo em
Comparação com $vc(t)$ Real
para o Evento Tangenciando
os Limites de Tolerância
 $V_{mín}$ e $t_{máx}$

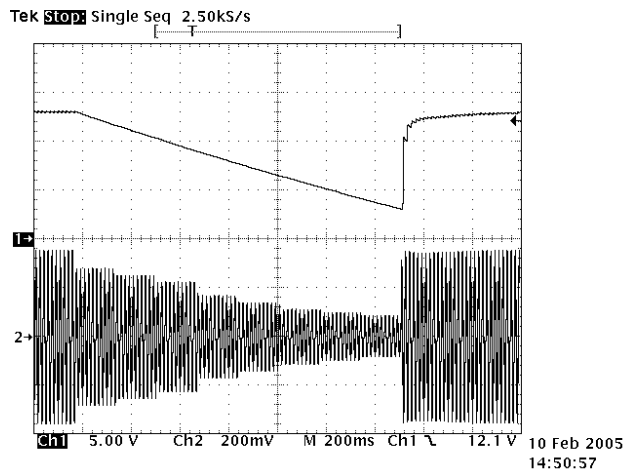


(c) Comparação entre Resposta
do Filtro Capacitivo e M&D

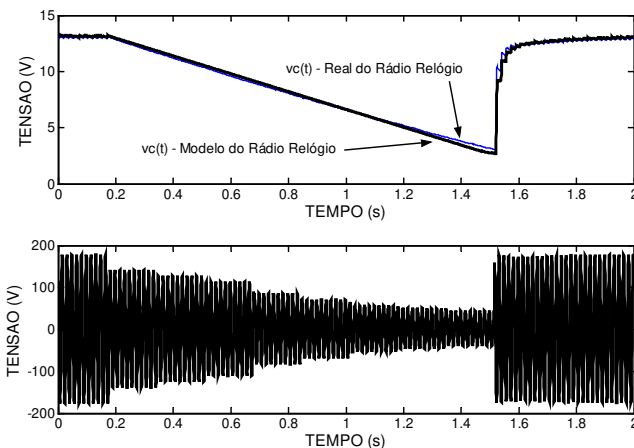
Figura 5.9 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando os Limites $V_{mín}$ e $t_{máx}$.

Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Rádio Relógio.

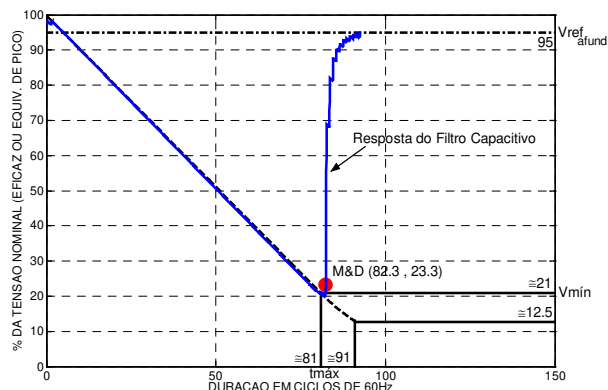
Até o momento foram apresentados eventos que não causam impacto sobre o rádio relógio. Na Figura 5.10 tem-se um evento que causa impacto sobre o rádio relógio. A principal característica desse evento é que uma primeira inspeção poderia sugerir que o evento é menos severo do que os apresentados anteriormente, o que não é real.



(a) Ensaio real:
Descarga do Capacitor do
Rádio Relógio e o Evento
Causador de Desligamento
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
200mV/div → 100V/div



(b) Simulação de:
vc(t) do Modelo em
Comparação com vc(t) Real
para o Evento Causador de
Desligamento



(c) Comparação entre Resposta
do Filtro Capacitivo e M&D

Figura 5.10 - Resposta do Rádio Relógio (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.

A metodologia da M&D demonstra que tal evento não seria considerado como impactante sobre o rádio relógio com magnitude = 23,3% e duração = 82,3 ciclos, o que não é verdade. Já a metodologia da Resposta do Filtro Capacitivo indica impacto sobre o rádio relógio, demonstrando ser mais realista na verificação de distúrbios de VTCD.

Na Figura 5.10(c) e Figura 5.11 pela resposta do filtro capacitivo é possível perceber uma pequena invasão da curva de descarga na região de mau funcionamento (1), Figura 5.4, que foi o suficiente para causar impacto no rádio relógio. Assim é possível notar a boa resposta dos modelos apresentados para caracterização do rádio relógio frente a distúrbios de VTCD como um indicador muito mais confiável.

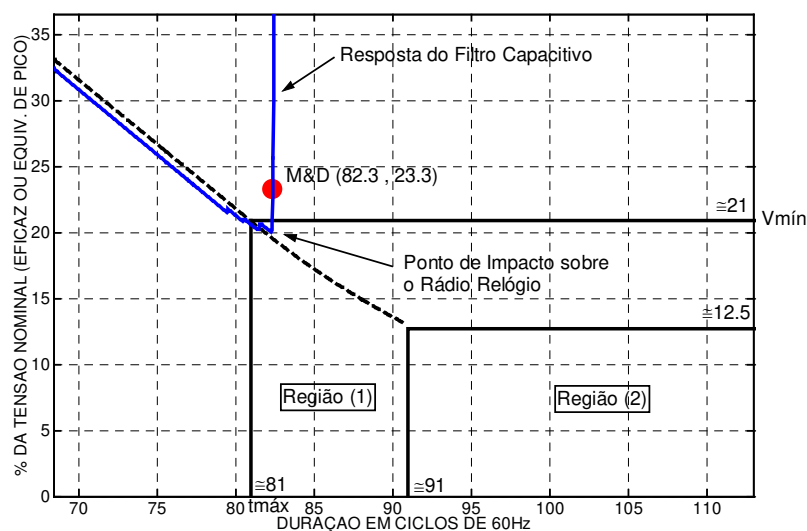
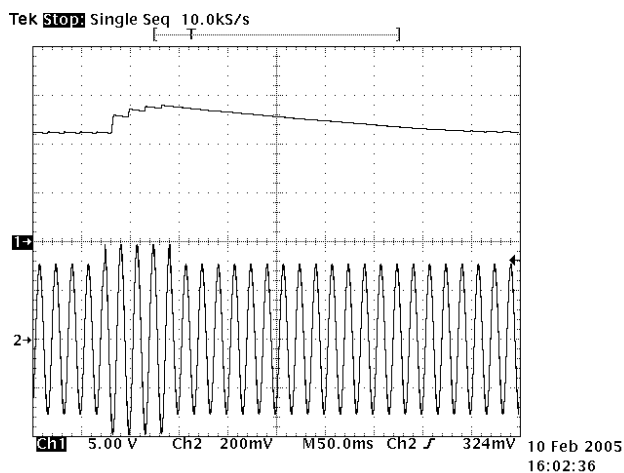


Figura 5.11 - Ampliação para Visualização do Ponto de Impacto do Afundamento de Tensão.

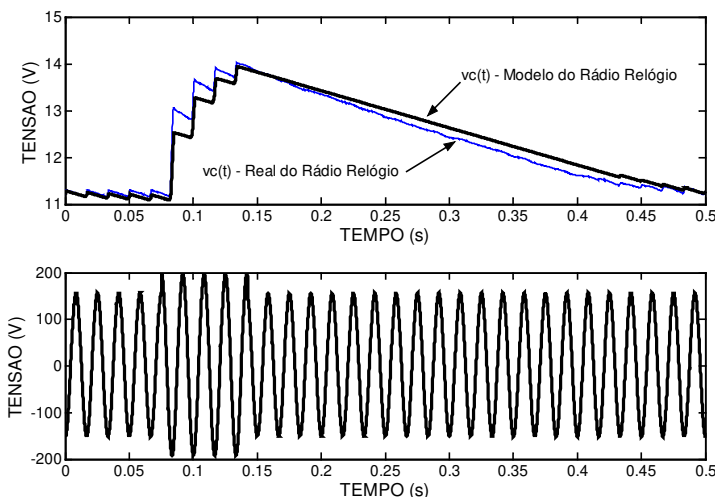
Resposta a Elevação de Tensão.

Apesar de não se conhecer e não ser possível obter os Limites de Tolerância a Elevações de Tensão para o rádio relógio aplicou-se elevações controladas de baixa magnitude para poder observar a resposta do mesmo.

Na Figura 5.12 pode-se ver uma elevação de 4,0 ciclos com magnitude de 125%. Importante perceber que a tensão em regime nominal aplicada não é de 127V, mas de 110V, para ter-se maior margem para aplicação da elevação de tensão.



(a) Ensaio real:
Resposta do Rádio Relógio a
Uma Elevação de Tensão
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
200mV/div → 100V/div



(b) Simulação de:
vc(t) do Modelo em
Comparação com vc(t) Real
para o Evento de Elevação
de Tensão

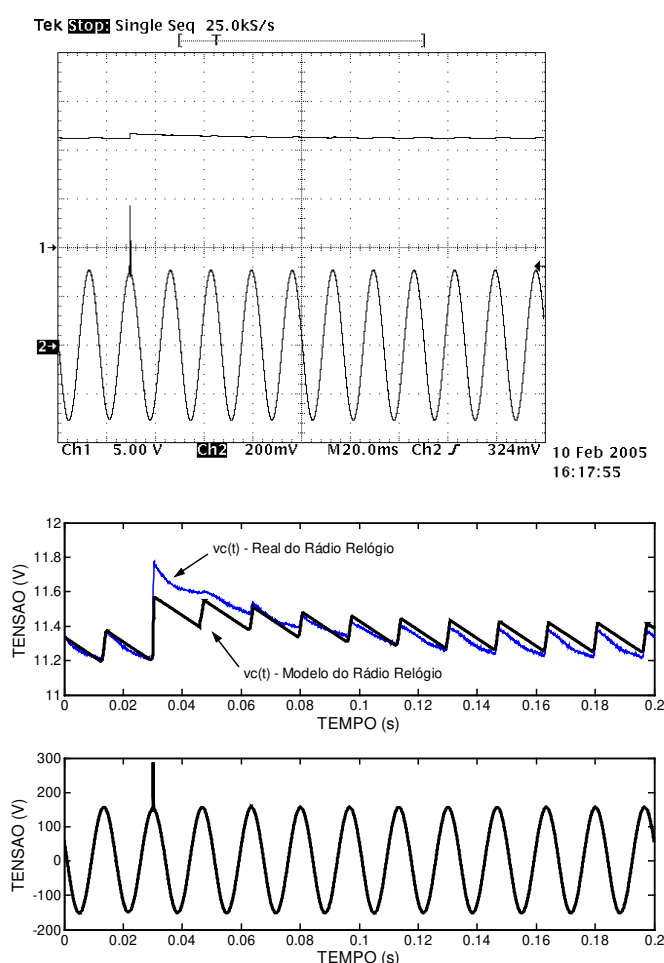
Figura 5.12 - Resposta do Rádio Relógio a uma Elevação de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Rádio Relógio – Evento de Elevação de Tensão.

A principal conclusão que se pode observar da Figura 5.12 é que o impacto real da elevação de tensão não durou apenas os 4 ciclos da rede, mas se prolongou por aproximadamente 22 ciclos, ou seja, os componentes a jusante do filtro capacitivo do rádio relógio sofreram impacto de elevação de tensão por este período, que se não danifica o rádio relógio de imediato, no mínimo reduz sua vida útil.

As diferenças observadas na resposta de carga, entre o real e o simulado, podem ser atribuídas à deficiência dos modelos apresentados. A caracterização de cada componente ainda apresenta erros se comparado com a resposta real. No caso da resposta de descarga, as diferenças podem ser atribuídas à dinâmica do rádio relógio, o modelo do SED é representado como um elemento de corrente constante o que também não é real.

Resposta a Surto de Tensão.

Na Figura 5.13 foi aplicado um surto de tensão, duração de microsegundos e magnitude de aproximadamente 200%, ou seja, o dobro da tensão nominal. Nota-se que o surto de tensão praticamente não tem impacto sobre o rádio relógio isso devido ao transformador abaixador na entrada do rádio relógio, onde os elementos série Leq e Req atenuam o valor do surto de tensão.



(a) Ensaio real:
Resposta do Rádio Relógio a
um Surto de Tensão
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
200mV/div $\rightarrow$ 100V/div

(b) Simulação de:
 $vc(t)$ do Modelo em
Comparação com $vc(t)$ Real
para o Surto de Tensão

Figura 5.13 - Resposta do Rádio Relógio a um Surto de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Rádio Relógio – Surto de Tensão.

Um ponto importante do estudo do comportamento das cargas, neste caso os equipamentos eletrônicos alimentados por fontes CC, é que, como a intenção é representar o comportamento das cargas, os distúrbios que podem ser analisados acabam não se limitando a VTCD. Como na Figura 5.13, a análise pode ser ampliada a distúrbios transitórios: surtos de

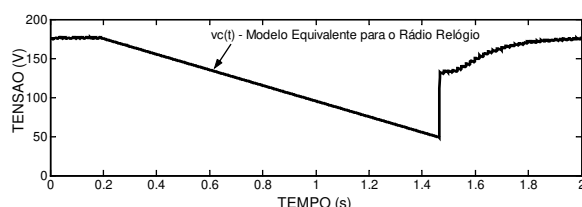
tensão, transitórios oscilantes e recortes de tensão “notches”. Esta é uma deficiência apresentada pela metodologia da M&D, o que não ocorre com a metodologia baseada na Resposta do Filtro Capacitivo, uma vez que representa o comportamento real das cargas eletrônicas.

5.1.3 Validação dos Modelos do Rádio Relógio (Forma Indireta).

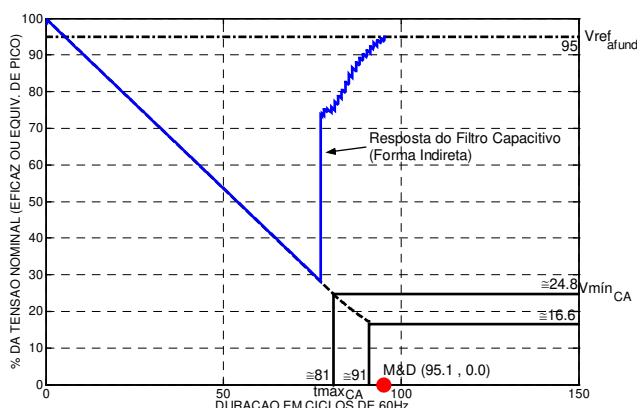
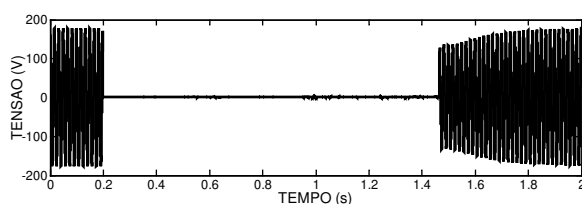
Utilizando-se dos mesmos distúrbios de VTCD aplicados para validação do modelo do rádio relógio pela Forma Direta, estes serão aplicados ao modelo equivalente para Forma Indireta.

Como neste caso tem-se um equivalente baseado em valores adotados que reagiria da mesma maneira que o modelo do rádio relógio, a comparação entre as curvas $v_c(t)$ reais com as $v_c(t)$ do modelo equivalente não é feita. A comparação deve ser feita com o intuito de verificar o impacto dos distúrbios de VTCD, ou seja, entre a metodologia da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo.

Afundamento de Tensão Tangenciando $tm_{\max CA}$, Não Causa Impacto.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Interrupção Tangenciando $tm_{\max CA}$



(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D

Figura 5.14 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D - Interrupção Tangenciando $tm_{\max CA}$.

Na Figura 5.14(a) é apresentado o evento de interrupção, mesmo da Figura 5.7, tangenciando $tm_{\max CA}$ e a resposta do modelo equivalente. Este evento não causa impacto no rádio

relógio.

A Resposta do Filtro Capacitivo demonstra que não houve impacto sobre o rádio relógio, porém a metodologia da M&D indica o contrário, invadindo a região de desligamento, as coordenadas foram: magnitude = 0,0% e duração $\cong 95,1$ ciclos, Figura 5.14(b).

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$, Não Causa Impacto.

Na Figura 5.15(a) é mostrado um evento que passa um pouco acima de $V_{\min_{CA}}$, o mesmo da Figura 5.8, também não causa impacto sobre o rádio relógio.

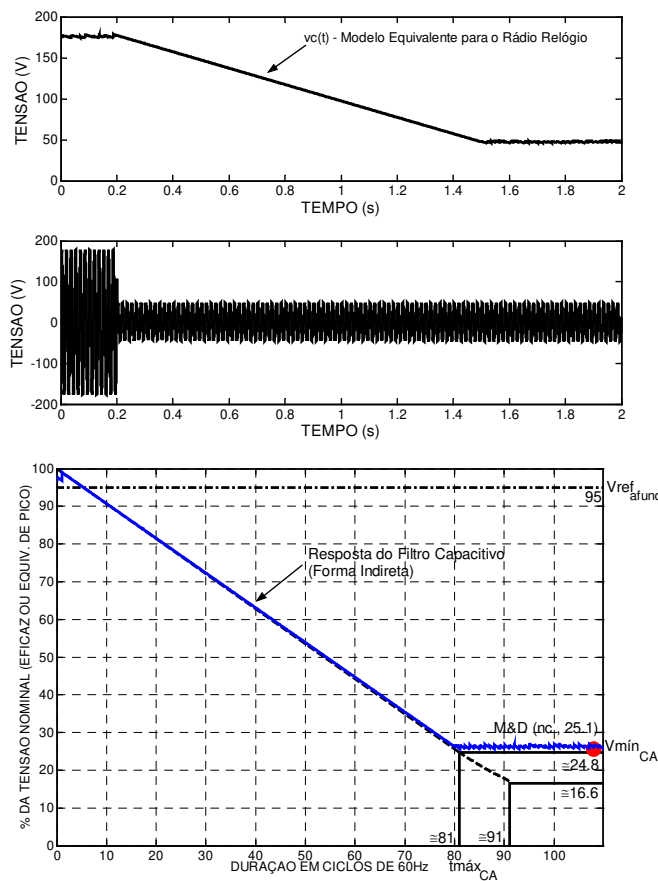


Figura 5.15 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$.

Considerando a metodologia da Resposta do Filtro Capacitivo, observa-se que o evento tangencia o do valor de $V_{\min_{CA}}$, mas não invade a região de mau funcionamento do rádio relógio. A metodologia da M&D também demonstra que não houve impacto sobre o rádio relógio. Ambas avaliam de modo correto a reação do rádio relógio.

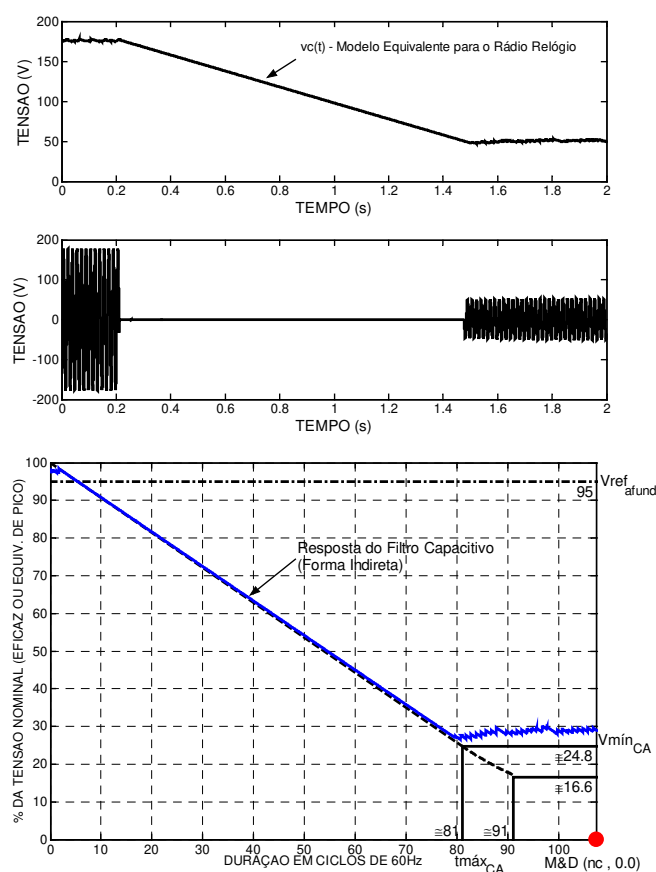
O evento teve duração muito superior à mostrada, durando aproximadamente 1 minuto,

no caso representado por “nc”, o que pode ser entendido como “n” ciclos, ou seja, poderia durar indefinidamente que não desligaria o rádio relógio.

Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{m\acute{a}x_{CA}}$ e $V_{m\acute{i}n_{CA}}$, Não Causa Impacto.

Outro evento gerado que não causa impacto no rádio relógio é apresentado na Figura 5.16, o mesmo da Figura 5.9, a resposta do modelo equivalente é apresentada no gráfico (a).

Na Figura 5.16(b) como na Figura 5.15(b) o valor descrito como “nc” (n ciclos) indica que o evento poderia perdurar indefinidamente que não afetaria o rádio relógio, no caso o teste foi realizado com $nc = 1$ minuto. As considerações são as mesmas da Forma Direta, o evento pelo ponto de vista da metodologia da M&D seria considerado como extremamente grave (alta severidade – alta possibilidade de impacto – interrupção de duração indefinida) o que não representa a realidade, pois não afeta o rádio relógio.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$ e $t_{m\acute{a}x_{CA}}$

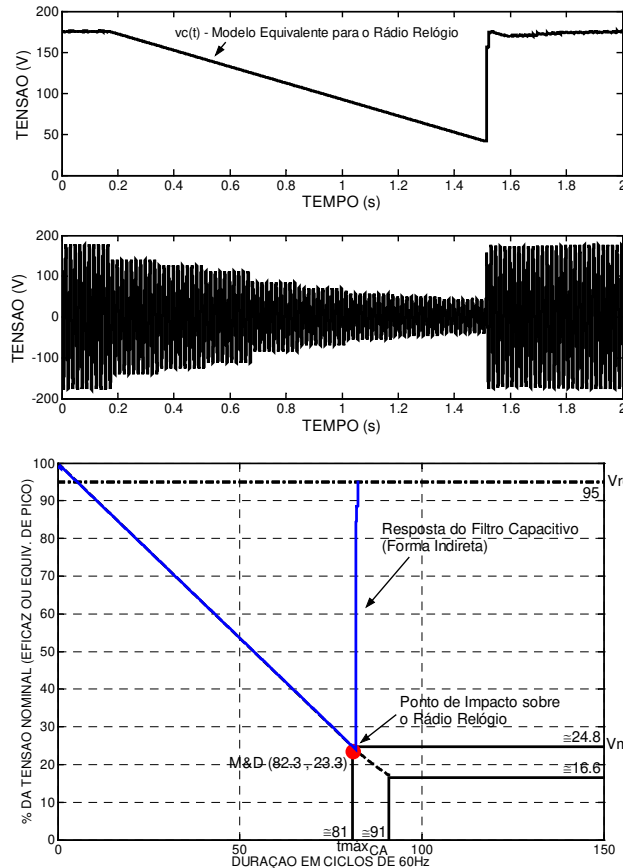
(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D

Figura 5.16 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{m\acute{i}n_{CA}}$ e $t_{m\acute{a}x_{CA}}$.

A metodologia da Resposta do Filtro Capacitivo demonstra de forma mais realista o impacto sobre o rádio relógio, onde é perceptível que o evento não causaria impacto sobre o rádio relógio.

Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Rádio Relógio (Forma Indireta).

Na Figura 5.17 tem-se um evento que causa impacto sobre o rádio relógio, o mesmo da Figura 5.10.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento que Causa Mau Funcionamento

(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D

Figura 5.17 - Resposta do Modelo Equivalente do Rádio Relógio (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.

Ambas as metodologias, M&D e Resposta do Filtro Capacitivo, indicam possibilidade de impacto sobre o rádio relógio, pois invadem a região de desligamento. O evento, pela M&D, seria classificado como magnitude = 23,3% e duração $\cong 82,3$ ciclos dentro da região de desligamento.

Observe que existe uma diferença entre a utilização dos limites de tolerância da Forma Direta com a Forma Indireta, justamente relacionado ao patamar de tensão mínima ($V_{mín} \neq V_{mín_{CA}}$), esta diferença é devido à interferência dos elementos em série com o filtro capacitivo (L_{eq} , r_D e v_D).

Importante salientar que os parâmetros obtidos pela Forma Direta representam a caracterização real, física, do equipamento eletrônico. Já, a caracterização pela Forma Indireta tem-se um equivalente em comportamento, não uma representação real do equipamento. Ambos os métodos, Forma Direta e Indireta, são válidos, porém é preciso saber quais são as limitações

de cada um. A utilização da metodologia da Resposta do Filtro Capacitivo Forma Direta e Indireta, caracterizaram de forma correta o impacto sobre o rádio-relógio.

Desta maneira o critério da Forma Direta poderia ser utilizado por fabricantes na caracterização de uma carga eletrônica alimentadas por fontes CC, pelo fato de serem os agentes que projetam e fabricam tais equipamentos, tendo acesso a todas as características de projeto e parâmetros, já que poderiam ser ensaiados um a um.

A Forma Indireta poderia ser utilizada por consumidores e concessionárias de energia elétrica para caracterização de equipamentos e processos sensíveis, sem a necessidade de uma intervenção profunda sobre tais cargas.

Tabela 5.5 - Comparação entre os Métodos da Forma Direta com a Forma Indireta

Forma Direta	X	Forma Indireta
Representação real da carga, parametricamente e em comportamento.	X	Representação por um equivalente em comportamento
Necessidade de se abrir o equipamento	X	Não é necessário abrir o equipamento
De fácil utilização por fabricantes	X	De fácil utilização por fabricantes
De difícil utilização por consumidores e concessionárias	X	De fácil utilização por consumidores e concessionárias
Muito Preciso	X	Preciso

5.1.4 Validação para Novas Condições de Operação (Rádio Relógio).

Os modelos apresentados para o rádio relógio, até o momento, baseiam-se na reprodução das condições de operação fornecidas pelo fabricante. Para considerarmos os modelos e parâmetros a afundamento de tensão como sendo gerais deve ser possível alterar as condições de operação do rádio relógio (nova condição) e determinar o novo ponto de impacto sobre o mesmo (PD_{novo}), com boa precisão.

Como foi apresentado no item 4.6 do Capítulo 4, será definido um novo ponto de desligamento alterando-se o valor do limite de duração máxima ($tm_{\max}$) original para uma nova condição ($tm_{\max,novo}$) e com isso obter-se um novo valor para o filtro capacitivo (C_{novo}). Após isso, novo ensaio é feito de modo a verificar o ponto de desligamento sob nova condição que deve resultar próximo do valor calculado ($tm_{\max,novo}$, C_{novo} e PD_{novo}).

Considerando para o rádio relógio que o $tm_{\max,novo} = 20,0$ ms, o ponto de desligamento esperado será $PD_{novo} (tm_{\max,novo}, V_{mín,original}) = PD_{novo} (20,0 \text{ ms}, 2,8V)$. A nova condição desejada é apresentada no gráfico da Figura 5.18.

As características do rádio relógio na condição original foram: tensão máxima antes do afundamento de tensão aproximadamente 13,4V, obtida por medição de $v_c(t)$, Figura 5.1, e o valor $I_c = 1,7458mA$, obtido pela Tabela 5.2.

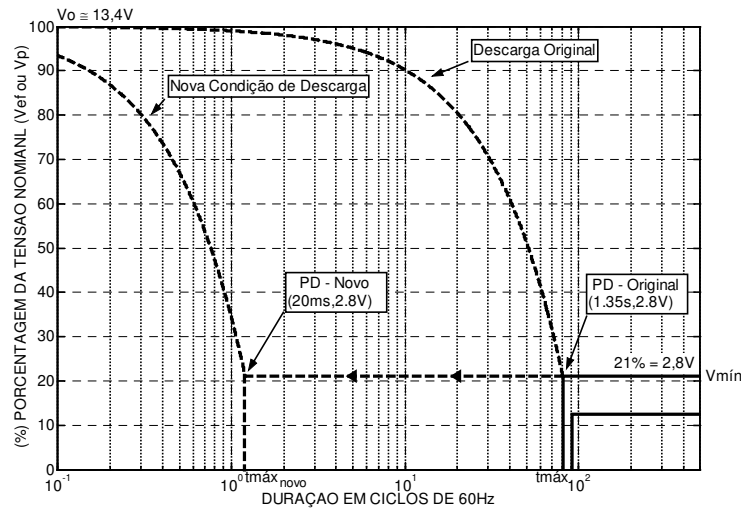


Figura 5.18 - Condições Originais e Novas Condições para o Ponto de Desligamento no Rádio Relógio

É possível encontrar o novo valor para o filtro capacitivo (C_{novo}), considerando que o rádio relógio é do tipo corrente constante:

$$C_{\text{novo}} = \frac{I_c \cdot t_{\text{máx}}_{\text{novo}}}{V_o - V_{\text{mín}}} = \frac{1,7458\text{mA} \cdot 20,0\text{ms}}{13,4\text{V} - 2,8\text{V}} = 3,29\mu\text{F} \quad (5.14)$$

Adotando-se um valor próximo de C_{novo} com o sendo:

$$C_{\text{AD}} = 5,0\mu\text{F}$$

O valor de $t_{\text{máx}}$ para o valor do filtro capacitivo de $C_{\text{AD}} = 5,0\mu\text{F}$ fica:

$$t_{\text{máx}}_{\text{AD}} = \frac{C_{\text{AD}} \cdot (V_o - V_{\text{mín}})}{I_c} = \frac{5,0\mu\text{F} \cdot (13,4\text{V} - 2,8\text{V})}{1,4758\text{mA}} = 30,4\text{ms}$$

Na Figura 5.19 pode-se verificar a nova resposta $v_c(t)$ para um capacitor de aproximadamente de $5,0\mu\text{F}$ (2 capacitores de valor comercial $10,0\mu\text{F}$ em série) em substituição daquele original do rádio relógio de $220,0\mu\text{F}$.

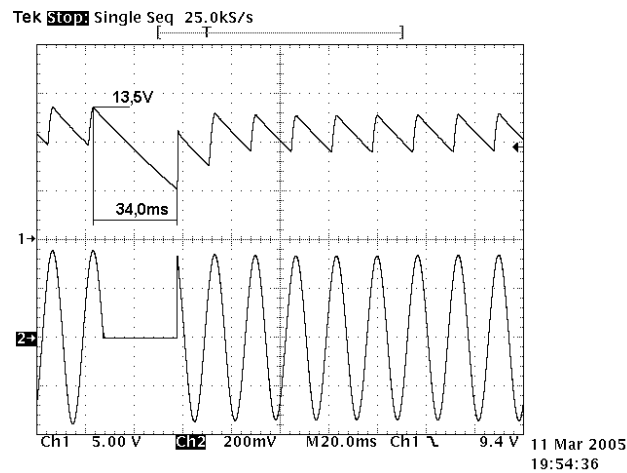


Figura 5.19 - $v_c(t)$ Obtido Depois da Troca do Capacitor Original de $220\mu\text{F}$ pelo Adotado $5,0\mu\text{F}$.

Partindo-se de $V_o \cong 13,5 \text{ V}$, pela Figura 5.19, este evento passa próximo a $t_{\text{máx}}$ em aproximadamente $34,0\text{ms}$ ($2,04$ ciclos) caindo até aproximadamente $5,0\text{V}$, tangenciando o ponto de desligamento novo (PD_{novo}). Por limitação da fonte geradora de VTCD não é possível determinar com exatidão o novo valor de $t_{\text{máx}}$ ($t_{\text{máx}_{\text{novo}}}$), ficando este compreendido entre $2,04$ ciclos e 3 ciclos. De qualquer modo o valor resultante ($34,0\text{ms}$) se aproxima do valor estimado pelo modelo ($30,0\text{ms}$) demonstrando a validade dos modelos e parâmetros propostos frente a VTCDs.

5.2 Televisor – Philips

Os ensaios e as análises que serão realizadas a seguir, no televisor e no microcomputador, são praticamente os mesmos feitos para o rádio relógio, por esse motivo e para evitar que o texto se torne repetitivo, a abordagem sobre esses outros dois equipamentos eletrônicos se dará de forma objetiva, com apresentação direta de resultados. Somente no caso de existirem pontos particulares serão dadas explicações mais completas.



Figura 5.20 - Televisor Marca Philips

Características gerais do televisor:

- Fonte CC chaveada;
- Bivolt automático, 127V ou 220V.

Da aplicação de VTCD:

- **Não Causa Impacto:** após aplicação da VTCD o televisor opera normalmente e não é observado distorção de imagem, mau funcionamento ou desligamento;
- **Causa Impacto:** após aplicação da VTCD o televisor apresenta distorção de imagem ou desligamento com perda de informações pré-ajustadas.

5.2.1 Extração de Parâmetros e Modelos para o Televisor

Parametrização de Forma Direta ou Invasiva

A Figura 5.21 apresenta o ensaio para extrair os parâmetros da resposta de carga do filtro capacitivo do televisor. A aplicação de baixa tensão na entrada foi realizada com a utilização de uma fonte CC (6030 A, HP – Hewlett Packard, 200V – 17A, 1000 W) ajustada em 3V, o motivo desse valor aplicado é para evitar picos de corrente muito elevados no momento da transição do degrau de tensão que levariam ao achatamento do degrau, ou seja, devido a limitação de resposta instantânea da fonte CC. Este tipo de ensaio foi apresentado no capítulo 4, item 4.3.1.

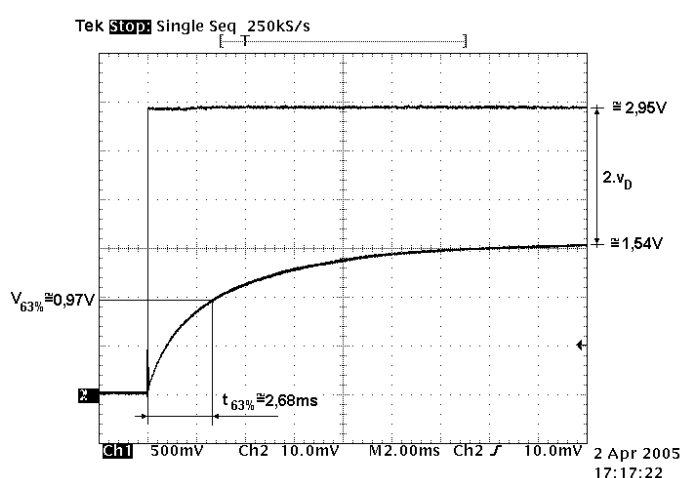


Figura 5.21 - Degrau de Tensão e Resposta do Filtro Capacitivo do Televisor, para extração dos parâmetros da Resposta de Carga do Filtro Capacitivo - Canal 2 (Ch2), 10mV/div → 500mV/div.

Pela Figura 5.21 é possível observar que a dinâmica da resposta $v_c(t)$ nos indica um sistema de primeira ordem, ou seja, os elementos indutivos de entrada (L_{eq}) podem ser considerados desprezíveis, isso em condições de laboratório, com explanado no Capítulo 4, no item 4.3.1. Importante lembrar que a Fonte CC chaveada não apresenta transformador de entrada, neste caso.

Tabela 5.6 - Parâmetros Obtidos do Microcomputador por Inspeção e pela Figura 5.21

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
C	Capacitor, estágio do filtro capacitivo	inspeção	220 μ F
r_D	Resistência interna do diodo (retificador de onda completa) + Circuito bivolt	medição/calculado	6,09 Ω
v_D	Tensão de polarização do diodo	medição	0,707 V

Abaixo, na Figura 5.22, é mostrado o ensaio para extração dos limites de tolerância a afundamentos de tensão do televisor. Os resultados são apresentados na Tabela 5.7 e gráfico com os limites pode ser visto na Figura 5.23. Os ensaios são baseados no capítulo 4, item 4.3.1.

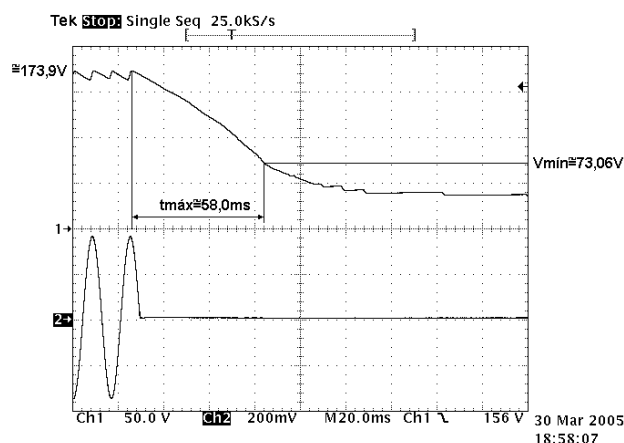


Figura 5.22 - $v_c(t)$ Devido a uma Interrupção - Extração dos Limites de Tolerância do Televisor, Canal 2 (Ch2), 200mV/div $\rightarrow$ 100V/div

Tabela 5.7 - Parâmetros Obtidos para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
T _{máx}	Limite de tempo máximo	medição	$\cong 58,0$ ms
V _{mín}	Limite de tensão mínima	medição	$\cong 73,06$ V
P _c	Equivalente do bipolo de potência constante	calculado	47,22 W
R _{trans}	Equivalente de impedância constante, resistência de transição.	calculado	228,61 Ω
R	Equivalente de impedância constante, resistência do bipolo de impedância constante.	calculado	2375,18 Ω

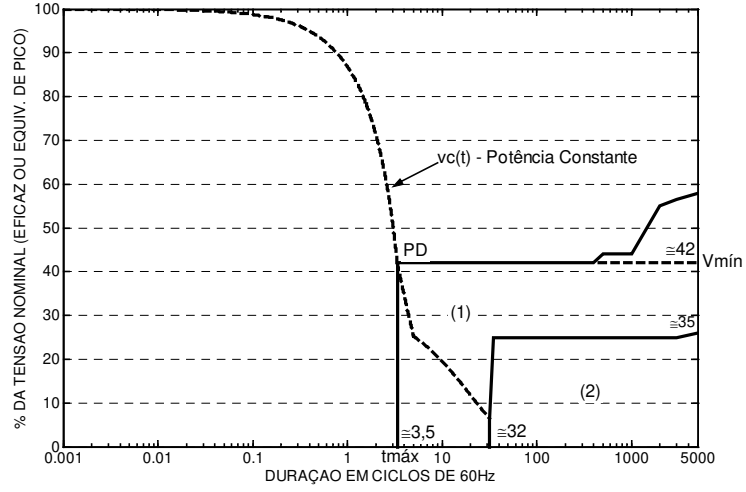


Figura 5.23 - Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão do Televisor (Forma Direta)

- (1) Região de mau funcionamento: os eventos nesta região causam impacto parcial no televisor (distorção de imagem);
- (2) Região de desligamento: os eventos nesta região causam desligamento total do televisor (perda de canal pré-ajustado).

Construção do Modelo do Televisor – Forma Direta

Modelos de Potência Constante (P_c), baseado nas equações (3.26) e (3.31):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{2,68 \cdot 10^{-3}} - 527,43 - \frac{vc(t)}{2,68 \cdot 10^{-3}} - \frac{214,63 \cdot 10^3}{vc(t)}$$

$$\frac{dvc}{dt} = - \frac{214,63 \cdot 10^3}{vc(t)}$$

Modelos de Impedância Constante (R_{TRANS}), baseados nas equações (3.32) e (3.12):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{2,68 \cdot 10^{-3}} - 393,02 \cdot vc(t) - 527,43$$

$$\frac{dvc}{dt} = - \frac{vc(t)}{50,29 \cdot 10^{-3}}$$

Modelos de Impedância Constante (R), baseados nas equações (3.32) e (3.12):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{2,68 \cdot 10^{-3}} - 375,05 \cdot vc(t) - 527,43$$

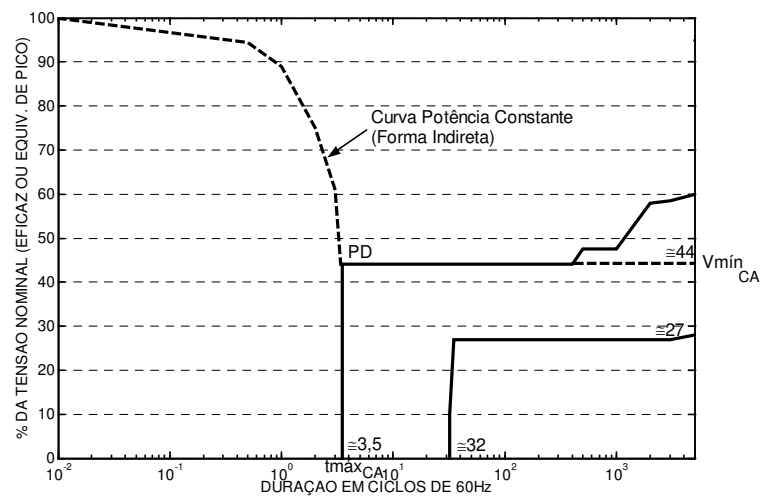
$$\frac{dvc}{dt} = -\frac{vc(t)}{522,54 \cdot 10^{-3}}$$

Parametrização de Forma Indireta ou Não Invasiva

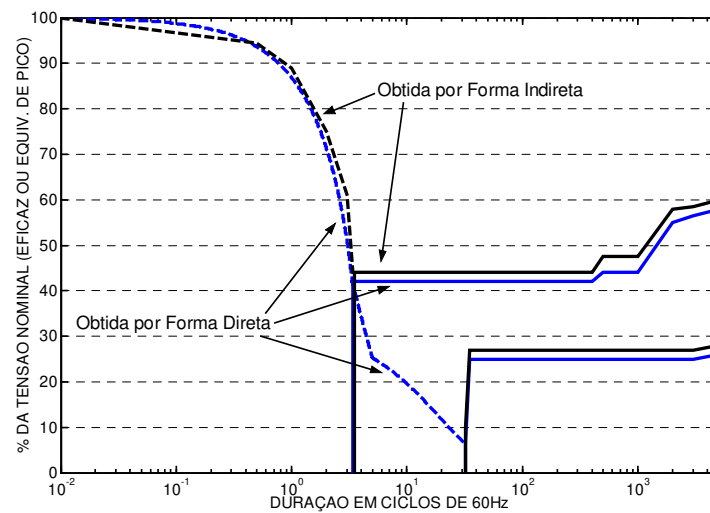
Os procedimentos para extração dos parâmetros na Forma Indireta foram descritos do capítulo 4, item 4.3.2, e os ensaios foram realizados em tensão nominal de 127V. Abaixo são apresentados os resultados obtidos, Tabela 5.8. O gráfico da Figura 5.24 (a) mostra os limites de tolerância a afundamentos de tensão obtidos por forma indireta, no gráfico (b) são comparado os limites de tolerância da Forma Direta com a Indireta.

Tabela 5.8 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Indireta)

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
tm_{CA}	Limite de tempo máximo pelo lado CA	medição	$\cong 58,0\text{ms}$
$V_{\text{mínCA}}$	Limite de tensão mínima pelo lado CA, baseado no valor de pico da tensão de entrada	medição/calculado	$\cong 79,13\text{V}$
C	Valor do estágio do filtro capacitivo	adotado	$470 \mu\text{F}$
P_{CCA}	Equivalente CA do bipolo de potência constante	calculado	$106,48 \text{ W}$



(a)



(b)

Figura 5.24 – Característica do Televisor Ensaiado:

- (a) Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão obtidos pelo lado CA;
 (b) Comparação entre os Limites Obtidos pela Forma Direta e Indireta.

Construção do Modelo do Televisor – Forma Indireta

Baseando-se na Tabela 5.8 e nas considerações abaixo, são extraídos os modelos pela Forma Indireta do televisor.

1. Televisor com fonte CC chaveada, baseando-se no gráfico da Figura 5.24(a), potência constante;
2. Retificador de onda completa (ponte retificadora a diodos)
3. Parâmetros relacionados a resposta de carga serão considerados desprezíveis, Tabela 5.9 e como é uma fonte do tipo chaveada, será considerado sem transformador de entrada:

Tabela 5.9 - Considerações para Resposta de Carga do Filtro Capacitivo (Forma Indireta)

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
r_D	Resistência interna do diodo (considerado desprezível)	adotado	0,001 Ω
v_D	Tensão de polarização do diodo (considerado ideal)	adotado	0,0 V

4. Não foi possível determinar a resposta de descarga do filtro capacitivo na região de mau funcionamento (1) e não é possível determinar tal resposta na região de desligamento por não ser observável o impacto no televisor.

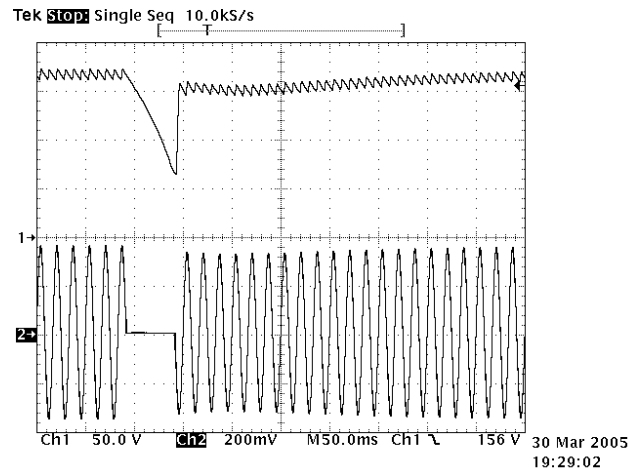
Modelos de Potência Constante (P_{CA}), baseado na equação (3.31):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{r_D \cdot C} - \frac{P_{CA}}{vc(t) \cdot C} - \frac{vc(t)}{r_D \cdot C} \rightarrow \frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{0,47 \cdot 10^{-6}} - \frac{226,55 \cdot 10^3}{vc(t)} - \frac{vc(t)}{0,47 \cdot 10^{-6}}$$

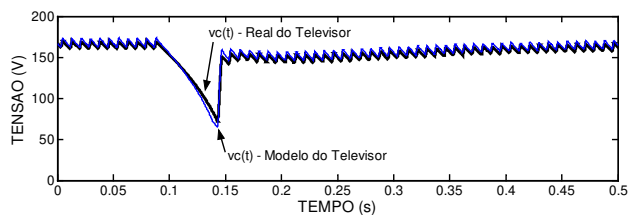
$$\frac{dvc}{dt} = - \frac{226,55 \cdot 10^3}{vc(t)}$$

5.2.2 Validação dos Modelos do Televisor (Forma Direta)

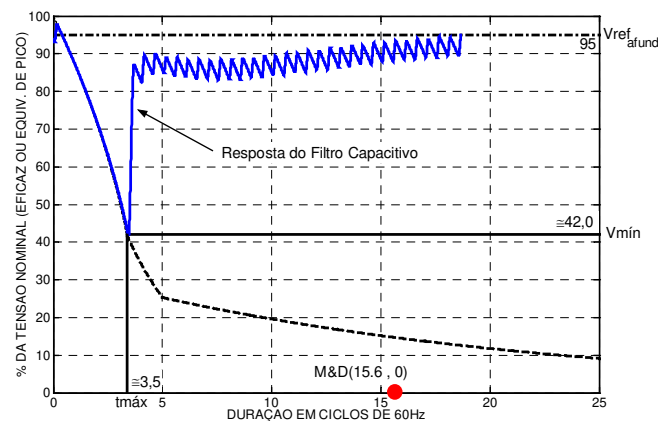
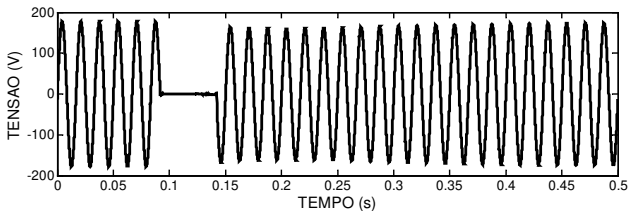
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$, Não Causa Impacto.



- (a) Ensaio real:
Descarga do Capacitor do Televisor e o Evento de Interrupção Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
200mV/div $\rightarrow$ 100V/div



- (b) Simulação de:
 $vc(t)$ do Modelo em Comparação com $vc(t)$ Real para a Interrupção



- (c) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D

Figura 5.25 -Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Interrupção Tangenciado $t_{m\acute{a}x}$.

Tabela 5.10 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Interrupção Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$, Não Causa Impacto.

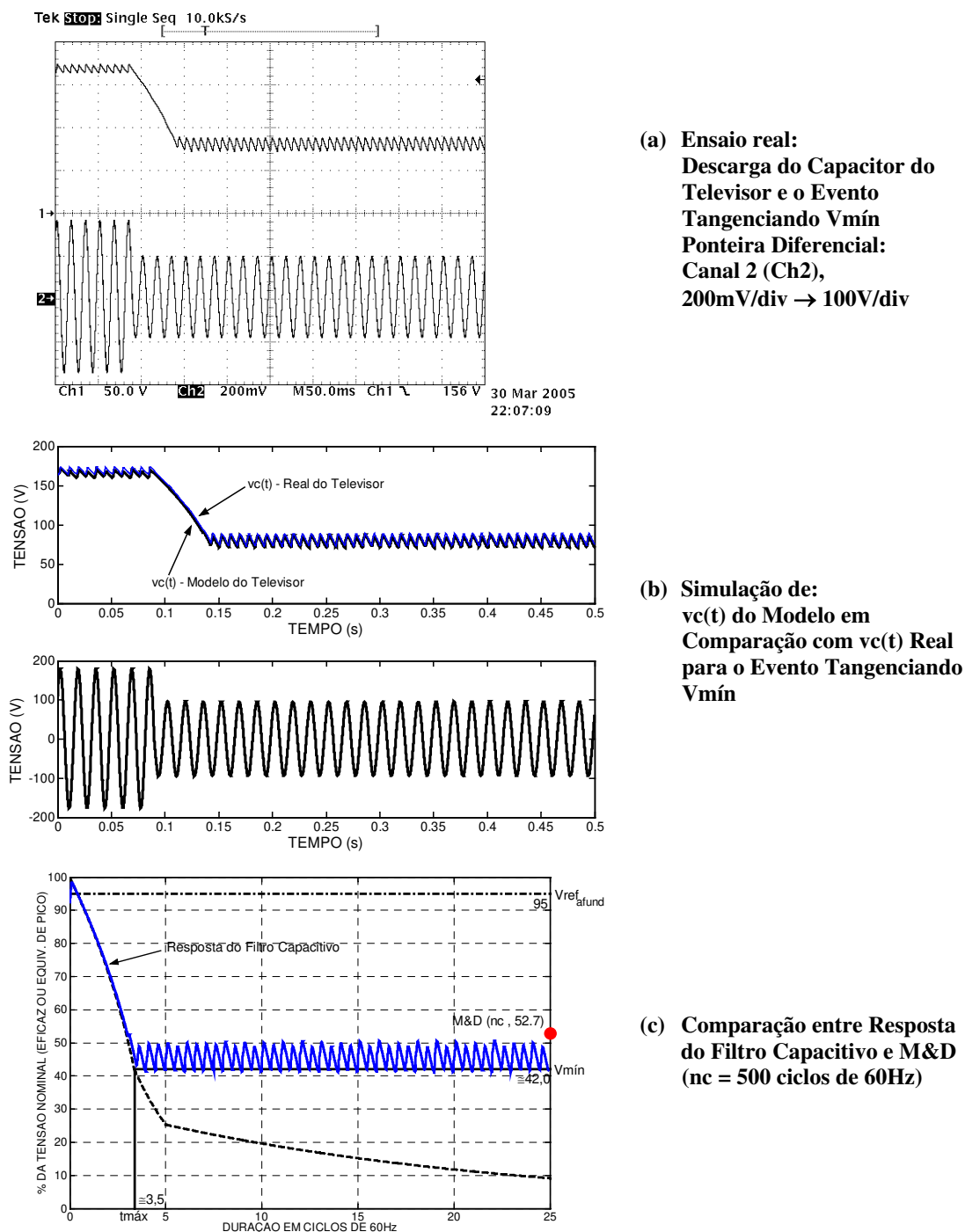


Figura 5.26 - Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$.

Tabela 5.11 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afundamento Tangenciando $V_{mín}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$ e $t_{\max}$, Não Causa Impacto.

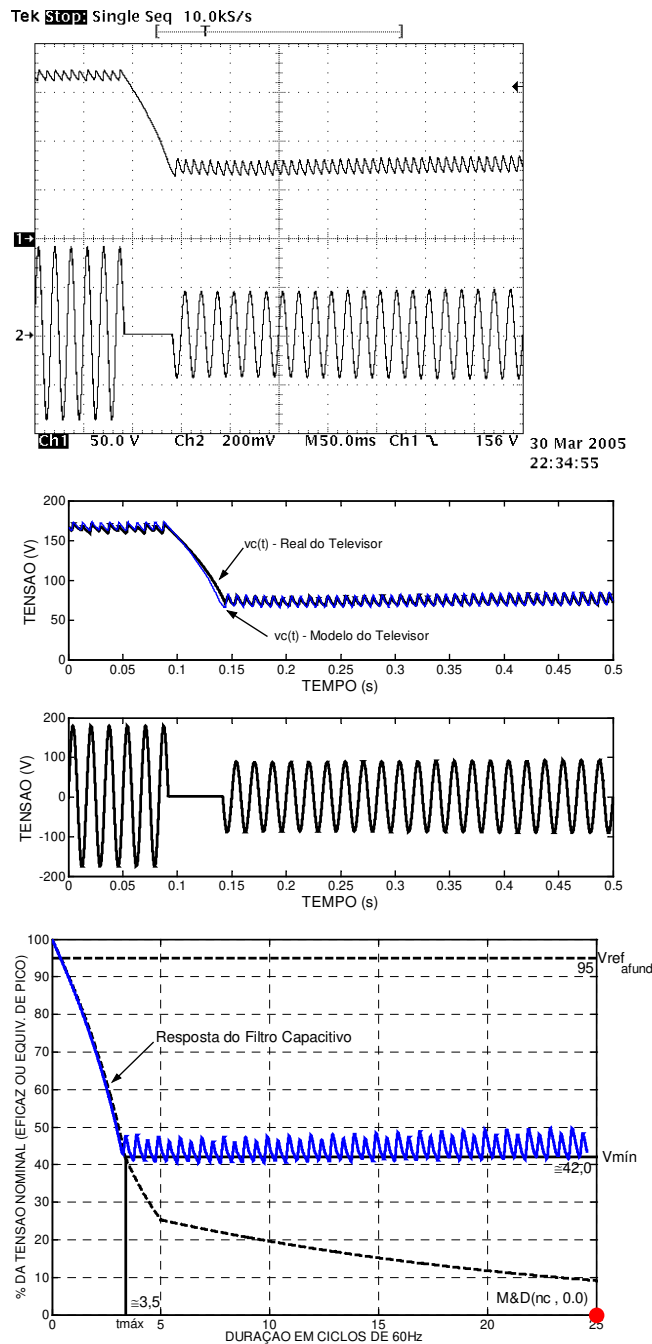
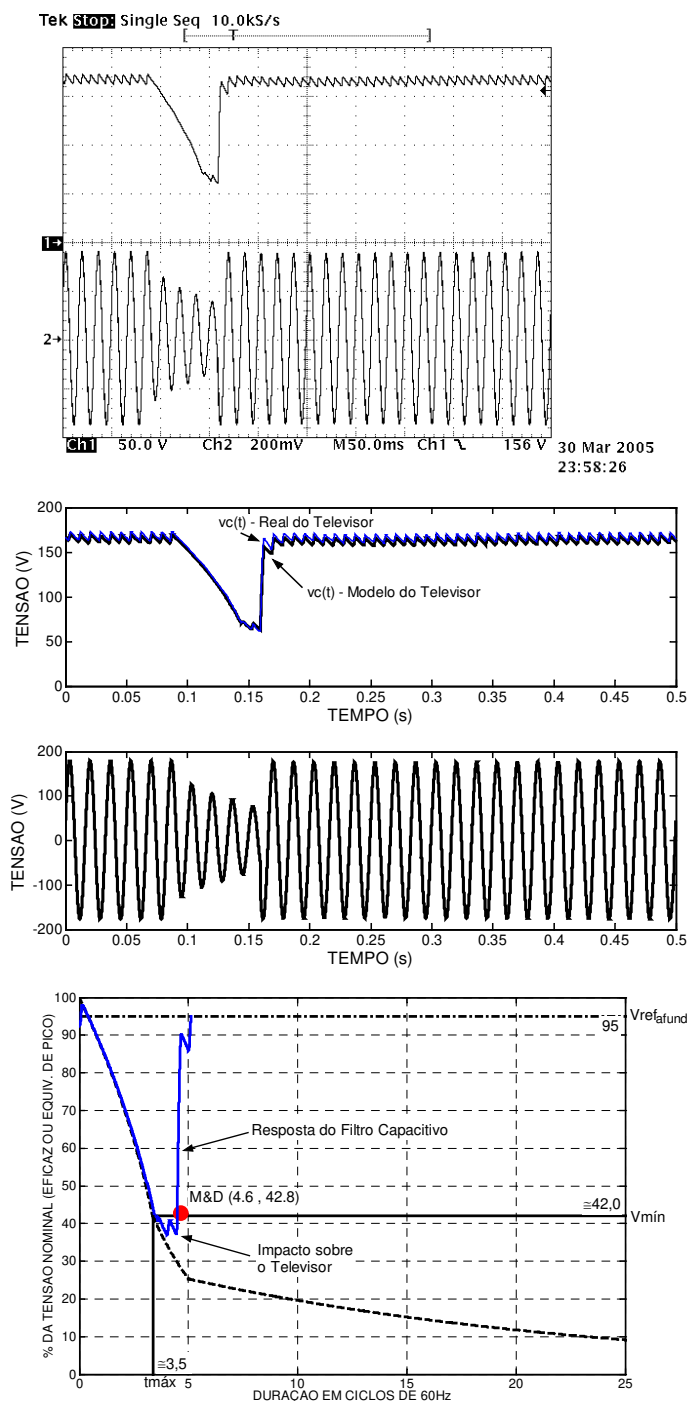


Figura 5.27 - Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando os Limites $V_{\min}$ e $t_{\max}$.

Tabela 5.12 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Tangenciando $V_{mín}$ e $t_{máx}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Televisor.



(a) Ensaio real:
 Descarga do Capacitor do
 Televisor e o Evento
 Causador de Desligamento
 Ponteira Diferencial:
 Canal 2 (Ch2),
 200mV/div → 100V/div

(b) Simulação de:
 vc(t) do Modelo em
 Comparação com vc(t) Real
 para o Evento Causador de
 Desligamento

(c) Comparação entre Resposta
 do Filtro Capacitivo e M&D

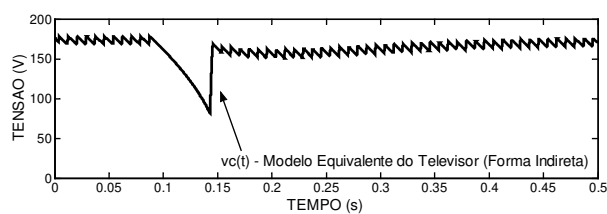
Figura 5.28 - Resposta do Televisor (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.

Tabela 5.13 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto

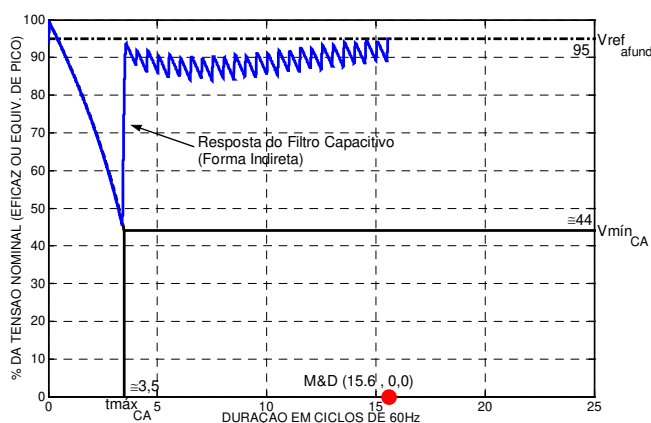
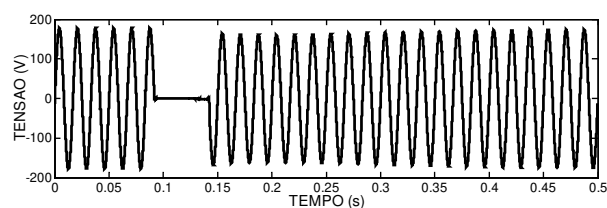
Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Não Deve Causar Impacto	Sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Possibilidade de Causar Impacto	Sofreu Impacto	Realista

5.2.3 Validação dos Modelos do Televisor (Forma Indireta)

Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{\max_{CA}}$, Não Causa Impacto.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Interrupção Tangenciando $t_{\max_{CA}}$



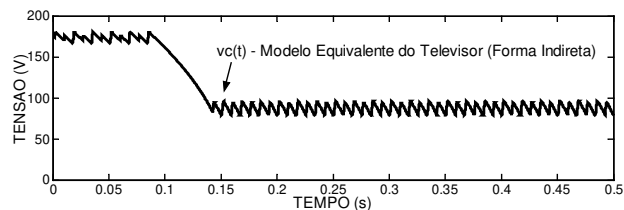
(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D

Figura 5.29 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D - Interrupção Tangenciando $t_{\max_{CA}}$.

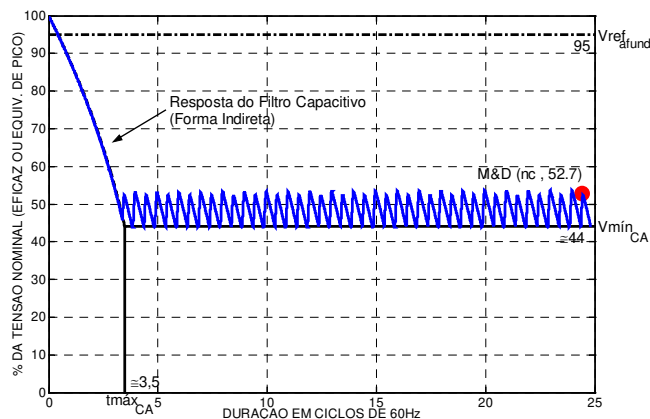
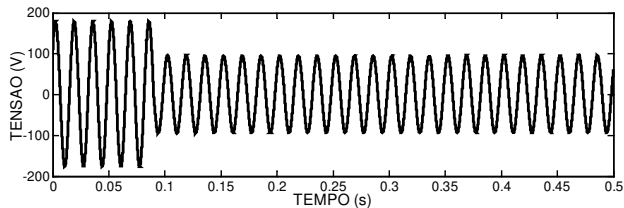
Tabela 5.14 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando $t_{\max_{CA}}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$, Não Causa Impacto.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$



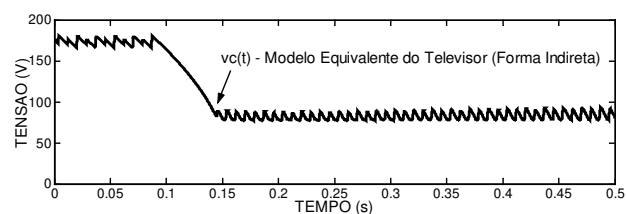
(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D ($n_c = 500$ ciclos de 60Hz)

Figura 5.30 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$.

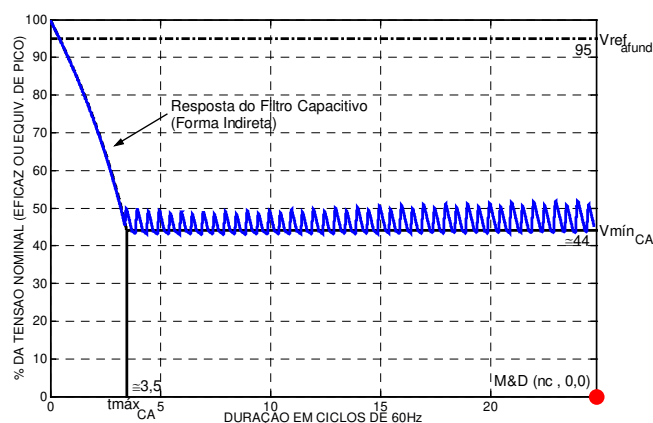
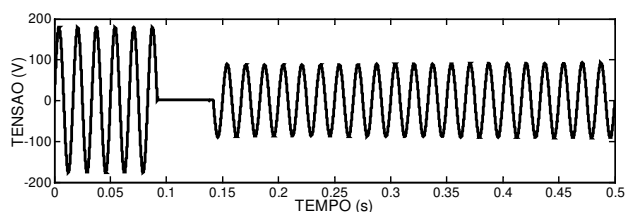
Tabela 5.15 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando $V_{\min_{CA}}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$, Não Causa Impacto.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$



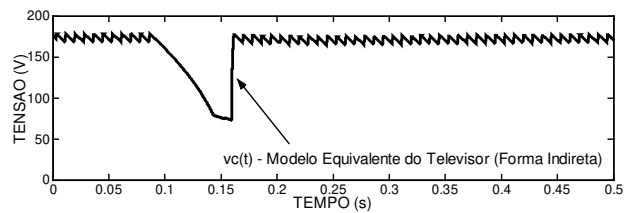
(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D ($n_c = 500$ ciclos de 60Hz)

Figura 5.31 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afund. Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$.

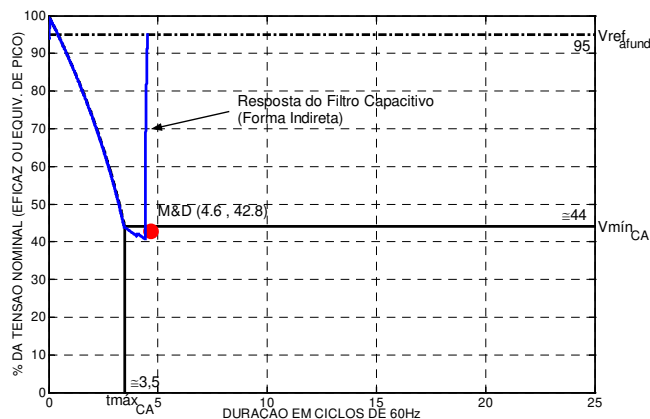
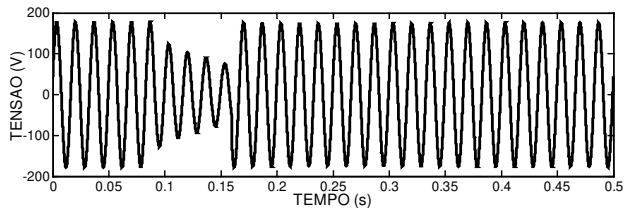
Tabela 5.16 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afund. Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Televisor.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento que Causa Mau Funcionamento



(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D

Figura 5.32 - Resposta do Modelo Equivalente do Televisor (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Mau Funcionamento.

Tabela 5.17 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Televisor	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista
Resposta do Filtro Capacitivo	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

5.2.4 Validação para Nova Condição de Operação (Televisor).

Baseando-se nas considerações do Capítulo 4, item 4.6 tem-se:

$$t_{\max_{\text{novo}}} = 20\text{ms}$$

$$V_{\min} = 73,06\text{V}$$

O valor do novo capacitor (C_{novo}) deve ser dimensionado conforme gráfico da Figura 5.33.

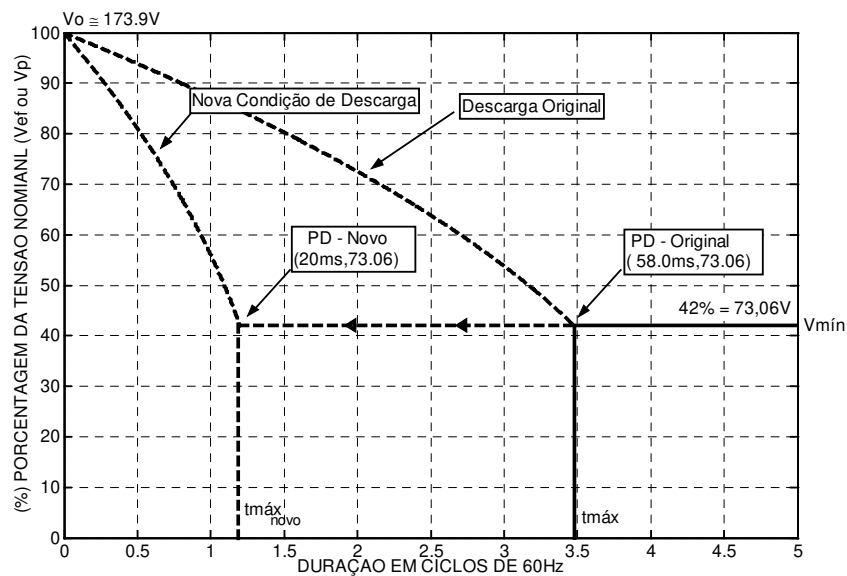


Figura 5.33 - Condições Originais e Nova Condição Desejada para o Televisor

O valor do capacitor C_{novo} é determinado:

$$C_{\text{novo}} = \frac{2 \cdot P_c \cdot t_{\max_{\text{novo}}}}{V_o^2 - V_{\min}^2} = \frac{2 \cdot 47,22\text{W} \cdot 20\text{ms}}{(173,9\text{V})^2 - (73,06\text{V})^2} = 75,84\mu\text{F}$$

Adotando-se uma associação de capacitores em paralelo:

$$C_{AD} = 76,0\mu\text{F} \quad (\text{adotado})$$

O novo valor de $t_{\max_{AD}}$ é:

$$t_{\max_{AD}} = \frac{C_{AD} \cdot (V_o^2 + V_{\min}^2)}{2 \cdot P_c} = \frac{76\mu\text{F} \cdot (173,9^2 + 73,06^2)}{2 \cdot 47,22\text{W}} = 20,04\text{ms}$$

A Figura 5.34 mostra o ensaio utilizando-se o capacitor adotado (C_{AD}), evento que tangencia o limite de mau funcionamento.

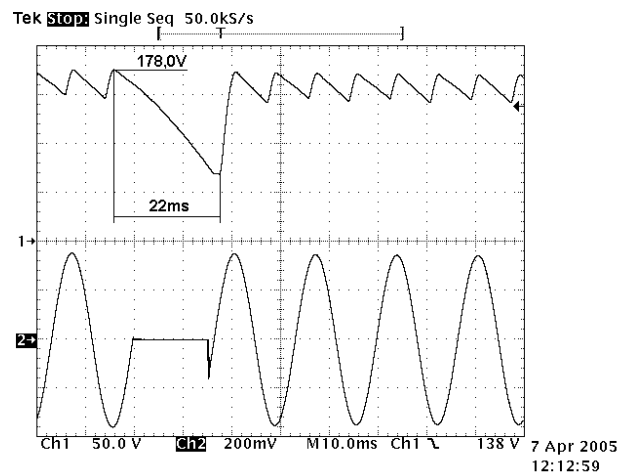


Figura 5.34 - $v_c(t)$ Obtido Depois da Troca do Capacitor (C_{AD}) no Televisor.

O valor observado para $t_{m\acute{a}x}$ do ensaio, Figura 5.34, é muito próximo do esperado e calculado, validando os modelos e parâmetros relevantes a VTCDs.

5.3 Microcomputador – Pentium 200MHz



Figura 5.35 – Microcomputador – Pentium MMX 200MHz

Características gerais do Microcomputador:

- Fonte CC chaveada;
- Bivolt manual, 127V ou 220V;

Da aplicação de VTCD:

- **Não Causa Impacto:** após aplicação da VTCD o microcomputador opera normalmente, não é observado distorção de imagem (monitor ligado ao gabinete), mau funcionamento ou desligamento;
- **Causa Impacto:** após aplicação da VTCD o microcomputador desliga por completo com perda total de informações, ao final de uma VTCD ele se reinicializar.

Foi considerada condição normal de operação e de ensaio, o microcomputador ligado com sistema operacional Windows 95, porém nenhum aplicativo operando, ou seja, somente o sistema operacional ativo. A tensão utilizada como nominal foi a de 220V.

5.3.1 Extração de Parâmetros e Modelos do Microcomputador

Parametrização de Forma Direta ou Invasiva

A Figura 5.36 apresenta o ensaio para extrair os parâmetros da resposta de carga do filtro capacitivo do Microcomputador, do mesmo modo que aplicado ao televisor, e as considerações também são as mesmas. A Tabela 5.18 apresenta os resultados obtidos do ensaio realizado (degrau de tensão).

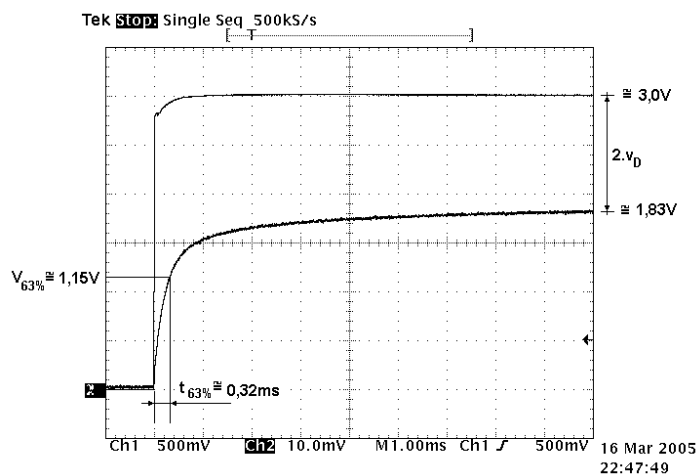


Figura 5.36 - Degrau de Tensão e Resposta do Filtro Capacitivo do Microcomputador, para extração dos parâmetros da Resposta de Carga do Filtro Capacitivo - Canal 2 (Ch2), 10mV/div → 500mV/div.

Tabela 5.18 - Parâmetros Obtidos do Microcomputador por Inspeção e pela Figura 5.21

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
C	Capacitor, estágio do filtro capacitivo	inspeção	660 μ F
r_D	Resistência interna do diodo (retificador de onda completa)	medição/calculado	0,241 Ω
v_D	Tensão de polarização do diodo	medição	0,585 V

Na Figura 5.37, é mostrado o ensaio para extração dos limites de tolerância a afundamentos de tensão do microcomputador, os resultados são apresentados na Tabela 5.19 e o gráfico com os limites pode ser visto na Figura 5.38.

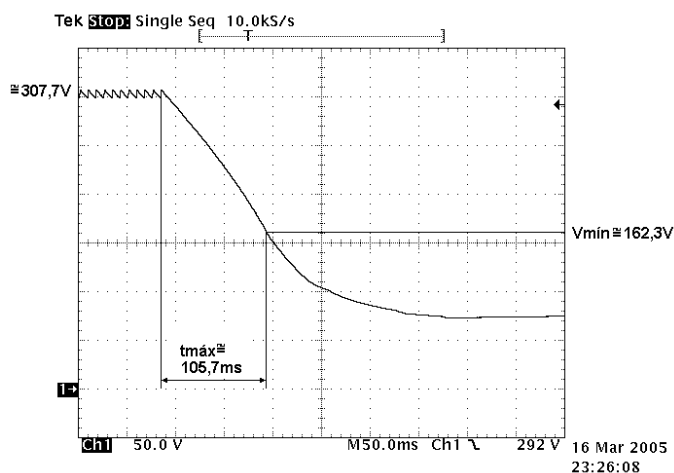


Figura 5.37 - $v_c(t)$ Devido a uma Interrupção - Extração dos Limites de Tolerância do Microcomputador

Tabela 5.19 - Parâmetros Obtidos para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
T _{máx}	Limite de tempo máximo	medição	$\approx 105,7$ ms
V _{mín}	Limite de tensão mínima	medição	$\approx 162,28$ V
P _c	Equivalente do bipolo de potência constante	calculado	213,44 W
R _{trans}	Equivalente de impedância constante, resistência de transição.	calculado	357,5 Ω
R	Equivalente de impedância constante, resistência do bipolo de impedância constante.	*****	Não foi possível ser determinado

Observação: Os parâmetros medidos são válidos para as condições de operação dadas do microcomputador. Outros valores podem resultar sob condições de operação distintas, por exemplo: nível de atividade da CPU, brilho do monitor, etc.

O bipolo SED de impedância constante (R) que representa o estágio final de descarga do filtro capacitivo não pode ser determinado devido à sua constante de tempo ser muito longa, e o tempo máximo de varredura da instrumentação disponível não foi suficiente para verificar o perfil de decaimento da tensão $v_c(t)$. A possível explicação para tal fato está ligada a interrupção do sistema de controle e a circuito equivalente visto pelo filtro capacitivo representar um equivalente de alta impedância.

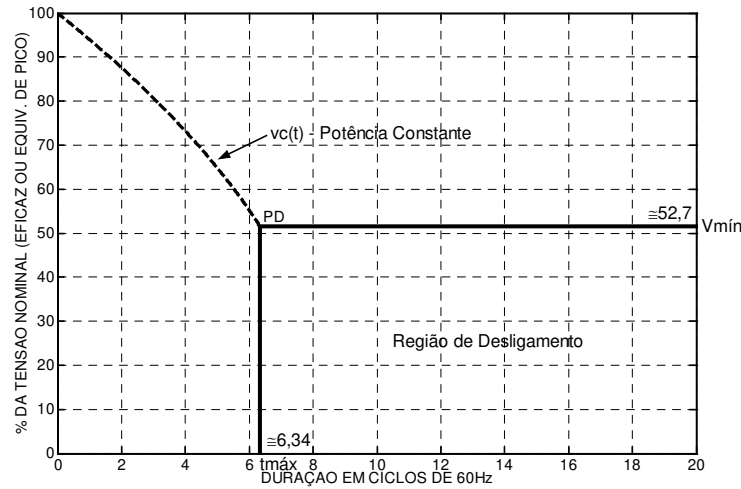


Figura 5.38 - Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão do Microcomputador (Forma Direta)

Construção do Modelo do Microcomputador – Forma Direta

Modelos de Potência Constante (Pc), baseado nas equações (3.26) e (3.31):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{321,95 \cdot 10^{-6}} - 3643,45 - \frac{vc(t)}{321,95 \cdot 10^{-6}} - \frac{325,05 \cdot 10^3}{vc(t)}$$

$$\frac{dvc}{dt} = - \frac{325,05 \cdot 10^3}{vc(t)}$$

Modelos de Corrente Constante (Ic), baseados nas equações (3.33) e (3.22):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{321,95 \cdot 10^{-6}} - 3643,45 - \frac{vc(t)}{321,95 \cdot 10^{-6}} - 1110,07$$

$$\frac{dvc}{dt} = -1110,07$$

Modelos de Impedância Constante (R_{TRANS}), baseados nas equações (3.32) e (3.12):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{321,95 \cdot 10^{-6}} - 311031 \cdot vc(t) - 3643,45$$

$$\frac{dvc}{dt} = - \frac{vc(t)}{235,95 \cdot 10^{-3}}$$

Parametrização de Forma Indireta ou Não Invasiva

A obtenção dos parâmetros na Forma Indireta obedeceu aos mesmos critérios utilizados no ensaio do televisor, e a tensão nominal de trabalho foi de 220V. Abaixo são apresentados os resultados obtidos, Tabela 5.20. O gráfico da Figura 5.39 (a) mostra os limites de tolerância a afundamentos de tensão obtidos por forma indireta, no gráfico (b) são comparado os limites de tolerância da Forma Direta com a Indireta.

Tabela 5.20 - Parâmetros para os Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão (Forma Indireta)

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
$t_{\text{máxCA}}$	Limite de tempo máximo pelo lado CA	medição	$\cong 105,7\text{ms}$
$V_{\text{mínCA}}$	Limite de tensão mínima pelo lado CA, baseado no valor de pico da tensão de entrada	medição/calculado	$\cong 164,70\text{V}$
C	Valor do estágio do filtro capacitivo	adotado	$470 \mu\text{F}$
P_{CCA}	Equivalente CA do bipolo de corrente constante	calculado	$149,88 \text{ W}$

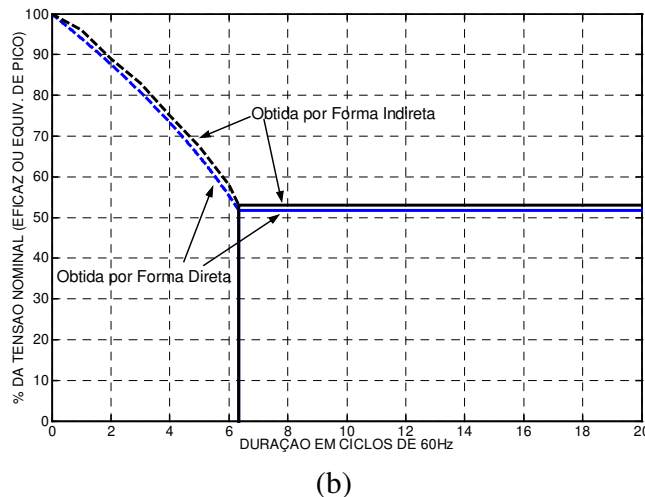
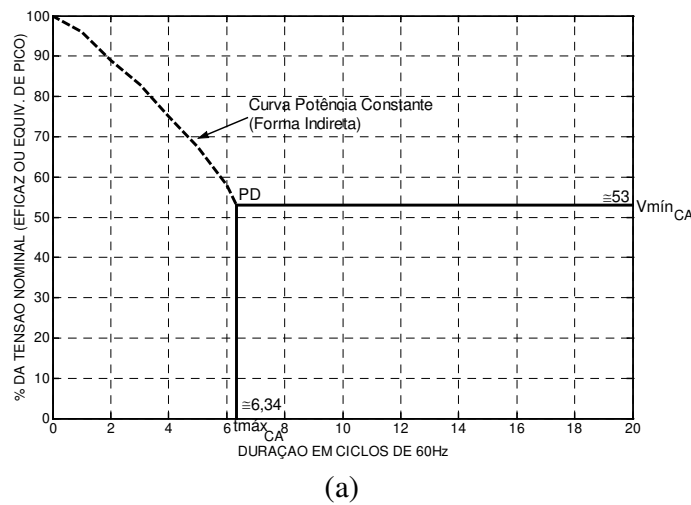


Figura 5.39 – Características do Microcomputador Ensaiado:

- (a) Limites de Tolerância a Afundamentos de Tensão obtidos pelo lado CA;
 (b) Comparação entre os Limites Obtidos pela Forma Direta e Indireta.

Construção do Modelo do Microcomputador – Forma Indireta

Baseando-se na Tabela 5.20 e nas considerações abaixo, são extraídos os modelos pela Forma Indireta do Microcomputador.

1. Microcomputador com fonte CC chaveada, baseando-se no gráfico da Figura 5.39(a), potência constante;
2. Retificador de onda completa (ponte retificadora a diodos)
3. Parâmetros relacionados à resposta de carga serão considerados desprezíveis, Tabela 5.21 e como é um fonte CC chaveada será considerado sem transformador de entrada:

Tabela 5.21 - Considerações para Resposta de Carga do Filtro Capacitivo (Forma Indireta)

Parâmetro	Descrição	Obtenção	Valor Obtido
r_D	Resistência interna do diodo (considerado desprezível)	adotado	0,001 Ω
v_D	Tensão de polarização do diodo (considerado ideal)	adotado	0,0 V

4. Não foi possível determinar a reposta de descarga do filtro capacitivo na região de desligamento por não ser observável o impacto no microcomputador.

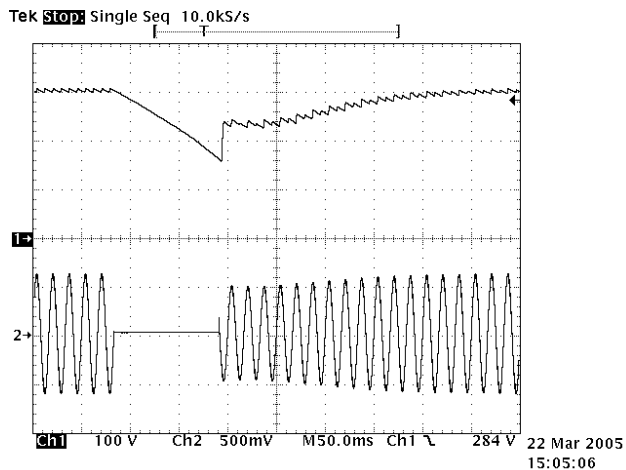
Modelos de Potência Constante (P_{CCA}), baseado na equação (3.31):

$$\frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{r_D \cdot C} - \frac{P_{CCA}}{vc(t) \cdot C} - \frac{vc(t)}{r_D \cdot C} \rightarrow \frac{dvc}{dt} = \frac{|e(t)|}{0,47 \cdot 10^{-6}} - \frac{318,89 \cdot 10^3}{vc(t)} - \frac{vc(t)}{0,47 \cdot 10^{-6}}$$

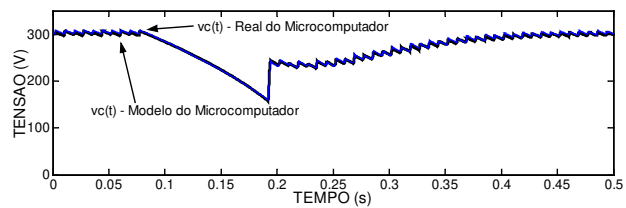
$$\frac{dvc}{dt} = - \frac{318,89 \cdot 10^3}{vc(t)}$$

5.3.2 Validação dos Modelos do Microcomputador (Forma Direta)

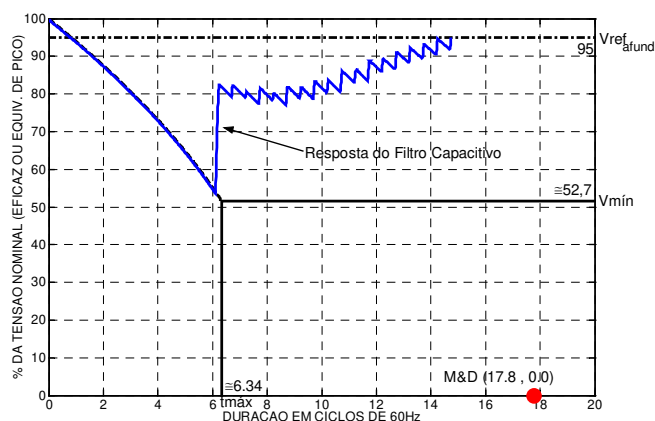
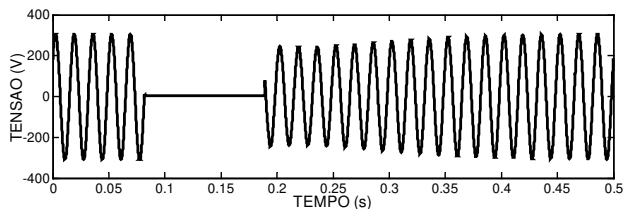
Afundamento de Tensão Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$, Não Causa Impacto.



- (a) Ensaio real:
Descarga do Capacitor do
Microcomputador e o
Evento de Interrupção
Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
500mV/div $\rightarrow$ 250V/div



- (b) Simulação de:
 $vc(t)$ do Modelo em
Comparação com $vc(t)$ Real
para a Interrupção



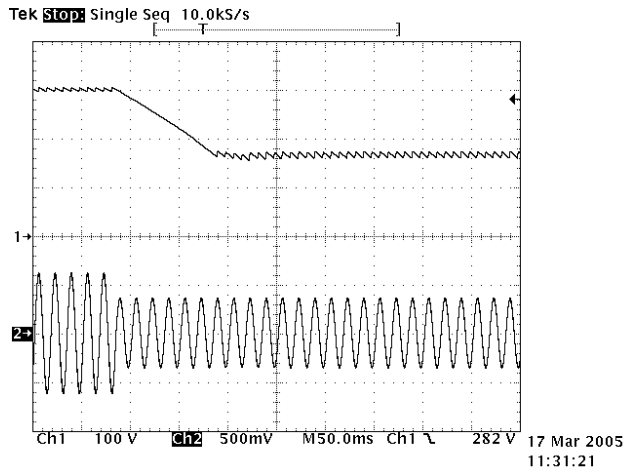
- (c) Comparação entre Resposta
do Filtro Capacitivo e M&D

Figura 5.40 -Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Interrupção Tangenciado $t_{m\acute{a}x}$.

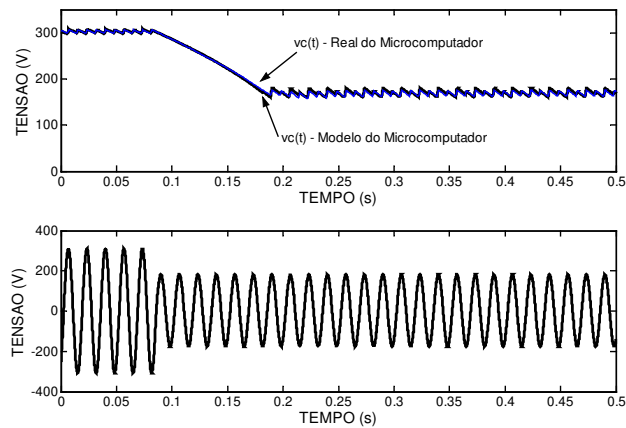
Tabela 5.22 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Interrupção Tangenciando $t_{m\acute{a}x}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

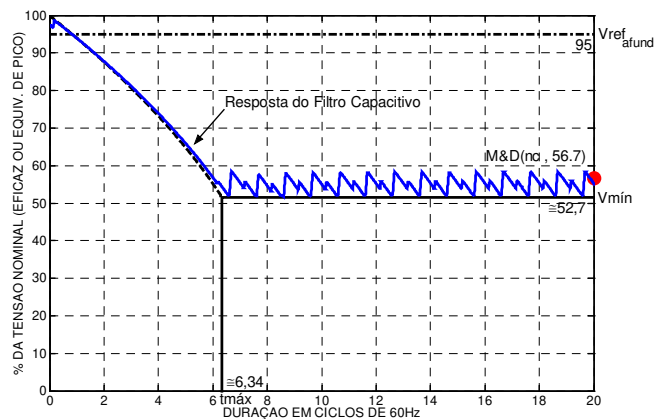
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$, Não Causa Impacto.



- (a) Ensaio real:
Descarga do Capacitor do
Microcomputador e o
Evento Tangenciando $V_{\min}$
Ponteira Diferencial:
Canal 2 (Ch2),
500mV/div $\rightarrow$ 250V/div



- (b) Simulação de:
 $vc(t)$ do Modelo em
Comparação com $vc(t)$ Real
para o Evento Tangenciando
 $V_{\min}$



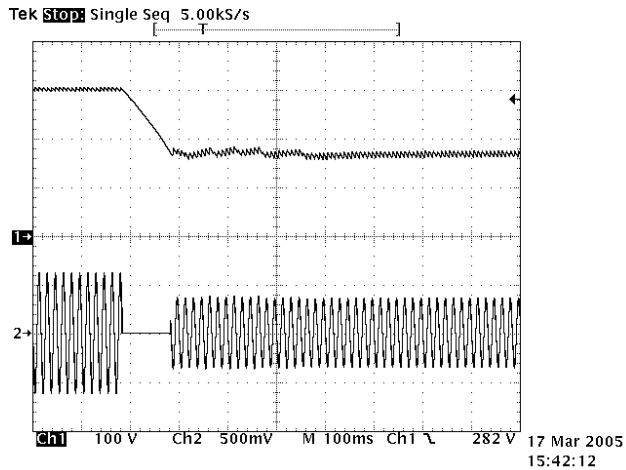
- (c) Comparação entre Resposta
do Filtro Capacitivo e M&D
(nc = 1 minuto)

Figura 5.41 - Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$.

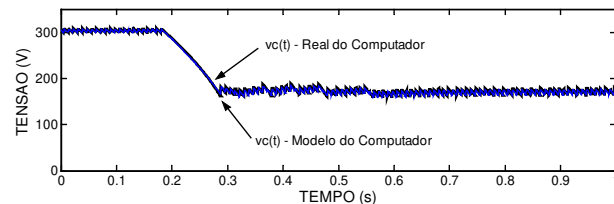
Tabela 5.23 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afundamento Tangenciando $V_{\min}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

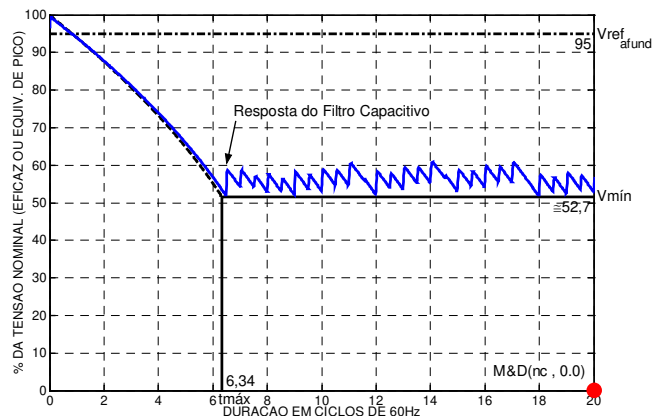
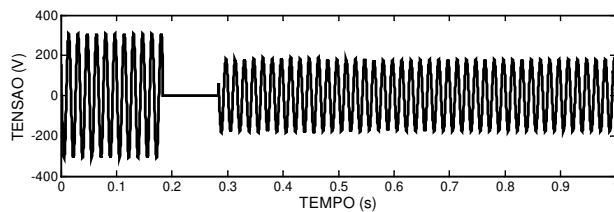
Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min}$ e $t_{\max}$, Não Causa Impacto.



- (a) Ensaio real:
 Descarga do Capacitor do
 Microcomputador e o
 Evento Tangenciando os
 Limites de Tolerância
 Ponteira Diferencial:
 Canal 2 (Ch2),
 500mV/div $\rightarrow$ 250V/div



- (b) Simulação de:
 $vc(t)$ do Modelo em
 Comparação com $vc(t)$ Real
 para o Evento Tangenciando
 os Limites de Tolerância
 $V_{\min}$ e $t_{\max}$



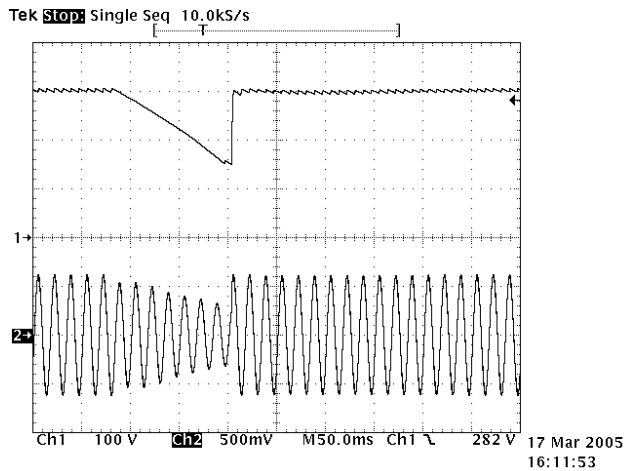
- (c) Comparação entre Resposta
 do Filtro Capacitivo e M&D
 (nc = 1minuto)

Figura 5.42 - Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando os Limites $V_{\min}$ e $t_{\max}$.

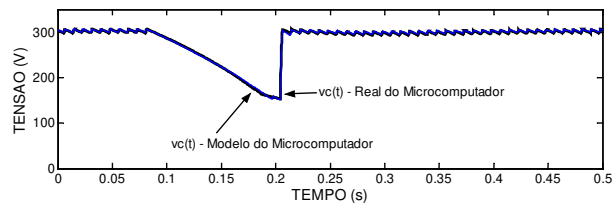
Tabela 5.24 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Tangenciando $V_{\min}$ e $t_{\max}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

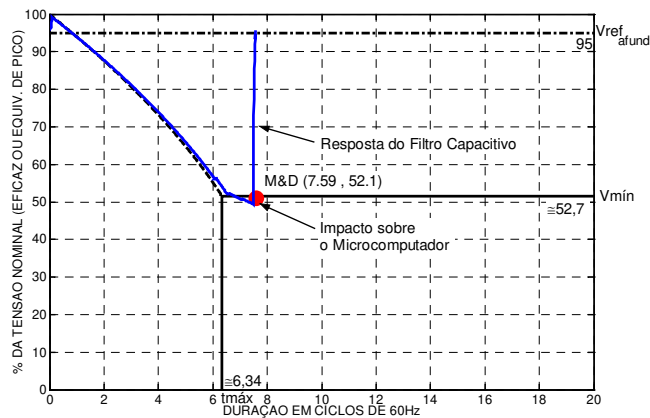
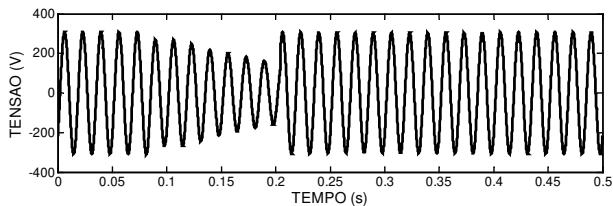
Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Microcomputador.



- (a) Ensaio real:
 Descarga do Capacitor do
 Microcomputador e o
 Evento Causador de
 Desligamento
 Ponteira Diferencial:
 Canal 2 (Ch2),
 500mV/div → 250V/div



- (b) Simulação de:
 vc(t) do Modelo em
 Comparação com vc(t) Real
 para o Evento Causador de
 Desligamento



- (c) Comparação entre Resposta
 do Filtro Capacitivo e M&D

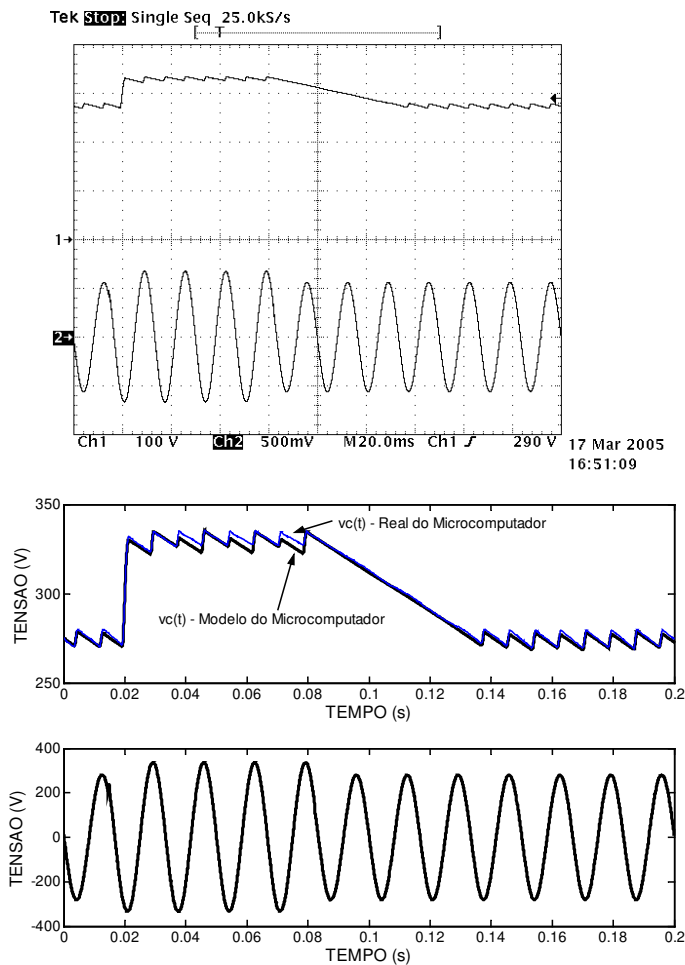
Figura 5.43 - Resposta do Microcomputador (Real e Modelo) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Desligamento

Tabela 5.25 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Sofreu Impacto	Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Possibilidade de Causar Impacto	Sofreu Impacto	Realista

Neste caso em que a metodologia da M&D também avaliou corretamente o impacto do evento que desligou o microcomputador.

Resposta a Elevação de Tensão.



(a) Ensaio real:
Resposta do
Microcomputador a uma
Elevação de Tensão

(b) Simulação de:
vc(t) do Modelo em
Comparação com vc(t) Real
para o Evento de Elevação
de Tensão

Figura 5.44 - Resposta do Microcomputador a uma Elevação de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Microcomputador – Evento de Elevação de Tensão

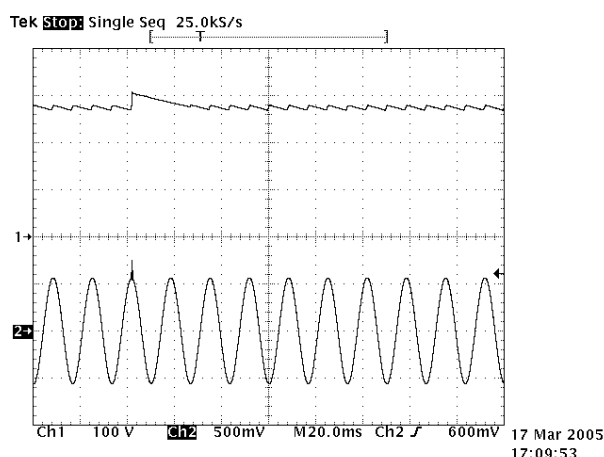
A condição de regime, tensão nominal $V_n = 198V$ (eficaz) ou $V_p = 280V$ (pico), para assim evitar danos ao equipamento, quando de aplicação de uma elevação de tensão.

Tabela 5.26 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Elevação de Tensão

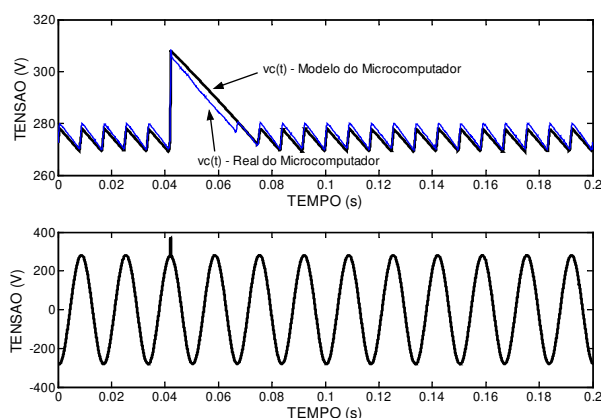
Metodologia	Valor Máximo	Duração
M&D	$\cong 335,0V \leftrightarrow \cong 120 \%$	$\cong 4$ ciclos de 60Hz
Resp. do Filtro Capacitivo	$\cong 335,0V \leftrightarrow \cong 120 \%$	$\cong 6,5$ ciclos de 60Hz

Todos os elementos a jusante do filtro capacitivo sofreram na realidade 2,5 ciclos de elevação de tensão a mais do que a duração verificada pela M&D.

Resposta a Surto de Tensão.



(a) Ensaio real:
Resposta do
Microcomputador a um
Surto de Tensão



(b) Simulação de:
vc(t) do Modelo em
Comparação com vc(t) Real
para o Surto de Tensão

Figura 5.45 - Resposta do Microcomputador a um Surto de Tensão e Comparação entre Resposta Real e o Modelo do Microcomputador – Surto de Tensão

A condição de regime, utilizada foi de $V_n = 198V$ (eficaz) ou $V_p = 280V$ (pico), para evitar danos ao equipamento, quando da aplicação do surto de tensão.

Tabela 5.27 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Surto de Tensão

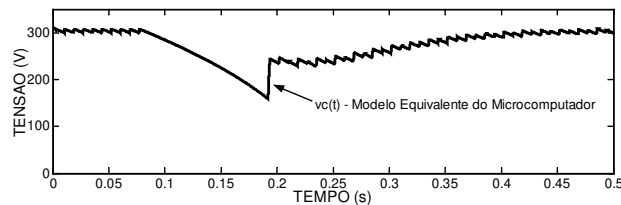
Metodologia	Valor Máximo	Duração
M&D	Não é aplicável	Não é aplicável
Resp. do Filtro Capacitivo	$\cong 308,0V \leftrightarrow \cong 110 \%$	$\cong 23ms$

Todos os elementos a jusante do filtro capacitivo sofreram na realidade 23ms de elevação de tensão, bem mais do que a duração do surto de tensão ($\cong 200 \mu s$).

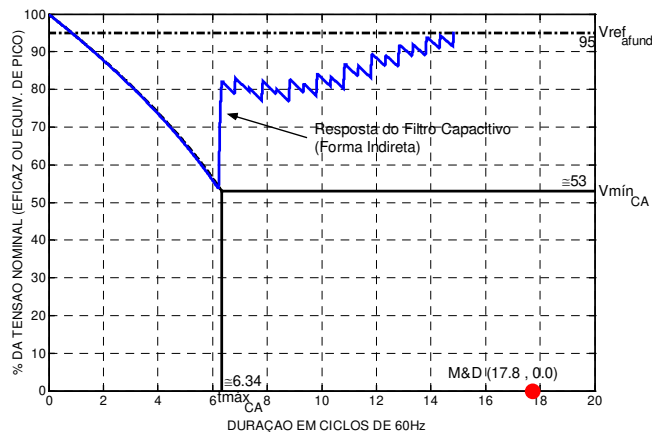
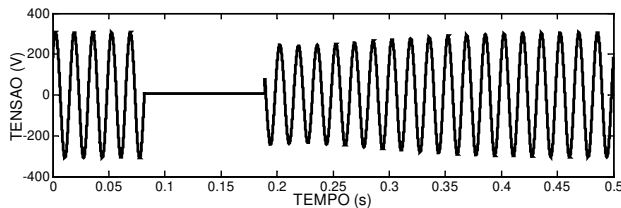
A metodologia da M&D neste caso não é aplicável, pois a utilização do valor eficaz da tensão não consegue representar transitórios que tenham duração menor que 1 ciclo da tensão fundamental. Como a metodologia da Resposta do Filtro Capacitivo tenta reproduzir o comportamento real das cargas, este também consegue representar os efeitos de transitórios. Esta é mais uma das vantagens da metodologia da Resposta do Filtro Capacitivo.

5.3.3 Validação dos Modelos do Microcomputador (Forma Indireta)

Afundamento de Tensão Tangenciando tm_{CA} , Não Causa Impacto.



(a) $vc(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Interrupção Tangenciando tm_{CA}



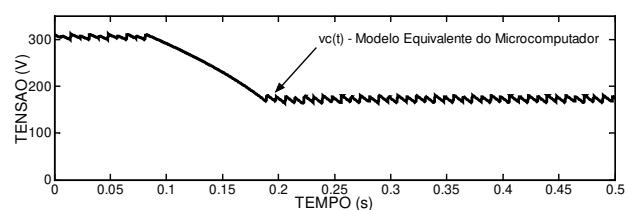
(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D

Figura 5.46 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D - Interrupção Tangenciando tm_{CA} .

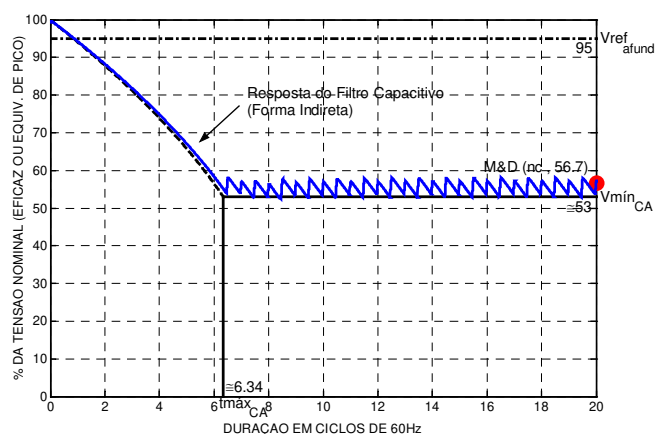
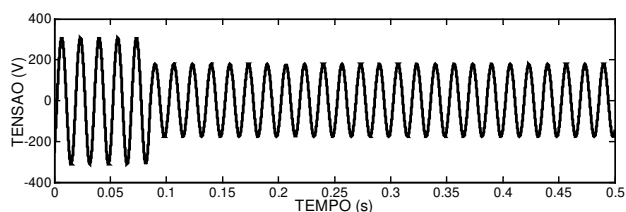
Tabela 5.28 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando tm_{CA}

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$, Não Causa Impacto.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$



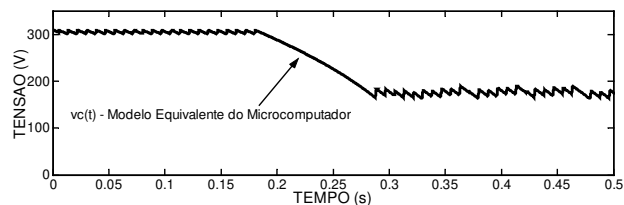
(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D ($nc = 1$ minuto)

Figura 5.47 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$.

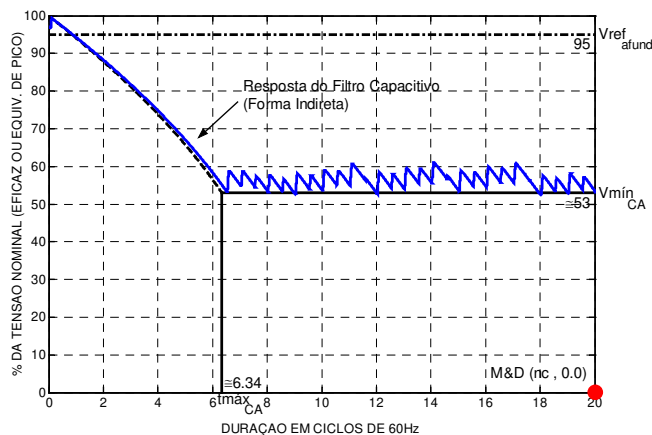
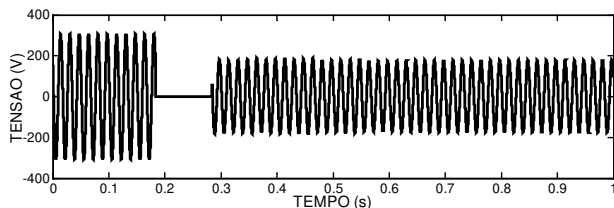
Tabela 5.29 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afundamento Tangenciando $V_{\min_{CA}}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$, Não Causa Impacto.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$



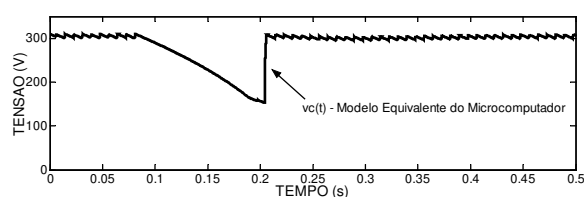
(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D ($nc = 1\text{minuto}$)

Figura 5.48 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Afundamento de Tensão Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$.

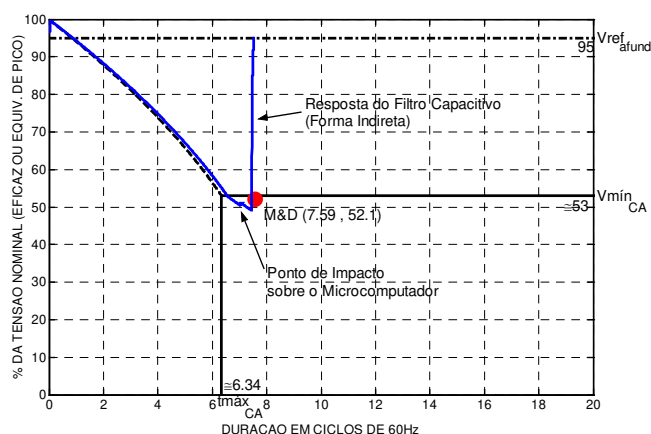
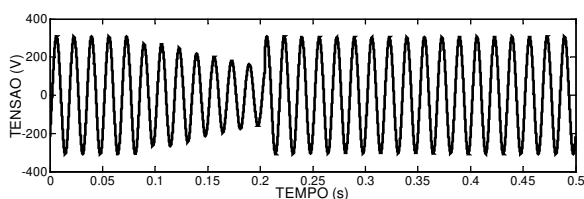
Tabela 5.30 - M&D e Resposta do Filtro Capacitivo (Forma Indireta), Afund. Tangenciando $V_{\min_{CA}}$ e $t_{\max_{CA}}$

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Pouco Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Não Deve Causar Impacto	Não sofreu Impacto	Realista

Afundamento de Tensão Causador de Impacto no Microcomputador.



(a) $v_c(t)$ do Modelo Equivalente Obtido pela Forma Indireta e Afundamento que Causa Mau Funcionamento



(b) Comparação entre Resposta do Filtro Capacitivo Forma Indireta e M&D

Figura 5.49 - Resposta do Modelo Equivalente do Microcomputador (Forma Indireta) e Comparação de Impacto entre Resposta do Filtro Capacitivo e M&D – Evento Causador de Desligamento.

Tabela 5.31 - Resultados da M&D e da Resposta do Filtro Capacitivo, Afund. Causador de Impacto

Metodologia	Avaliação da Metodologia	Reação Real do Microcomputador	Avaliação do Resultado
M&D	Possibilidade de Causar Impacto	Sofreu Impacto	Realista
Resposta. do Filtro Capacitivo	Possibilidade de Causar Impacto	Sofreu Impacto	Realista

5.3.4 Validação para Nova Condição de Operação (Microcomputador)

Baseando-se nas considerações do Capítulo 4, item 4.6 tem-se:

$$t_{\max_{\text{novo}}} = 20\text{ms}$$

$$V_{\min} = 162,28\text{V}$$

O valor do novo capacitor (C_{novo}) deve ser calculado conforme gráfico da Figura 5.50.

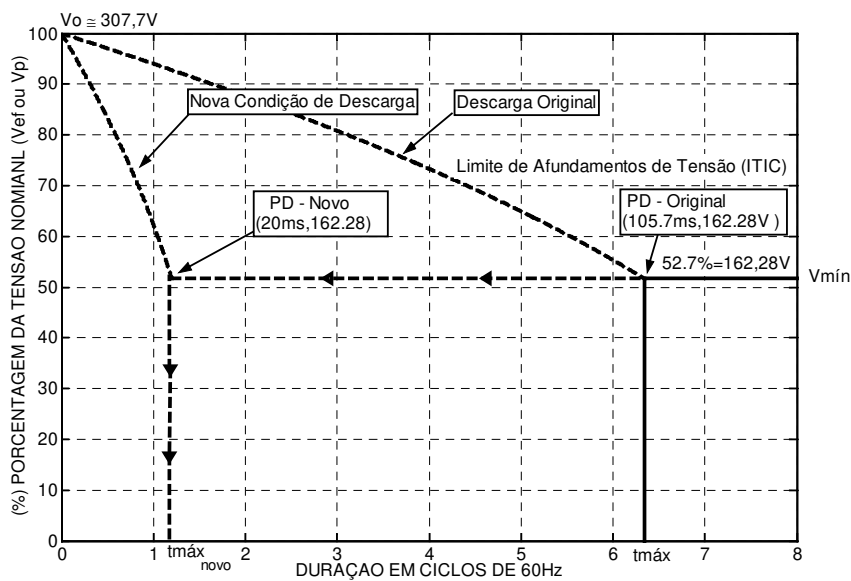


Figura 5.50 - Condições Originais e Nova Condição Desejada para o Microcomputador

O valor do capacitor mínimo C_{novo} é determinado:

$$C_{\text{novo}} = \frac{2 \cdot P_c \cdot t_{\max_{\text{novo}}}}{V_o^2 - V_{\min}^2} = \frac{2 \cdot 213,44\text{W} \cdot 20\text{ms}}{(307,7\text{V})^2 - (162,28\text{V})^2} = 124,9\mu\text{F}$$

Adotando-se o valor de:

$$C_{AD} = 138,0\mu\text{F} \quad (\text{adotado})$$

O novo valor de $t_{\max_{AD}}$ é:

$$t_{\max_{AD}} = \frac{C_{AD} \cdot (V_o^2 - V_{\min}^2)}{2 \cdot P_c} = \frac{138,0\mu\text{F} \cdot (307,7^2 - 162,28^2)}{2 \cdot 213,44\text{W}} = 22,09\text{ms}$$

A Figura 5.51 mostra o ensaio utilizando-se o capacitor adotado (C_{AD}), evento que tangencia o limite de desligamento.

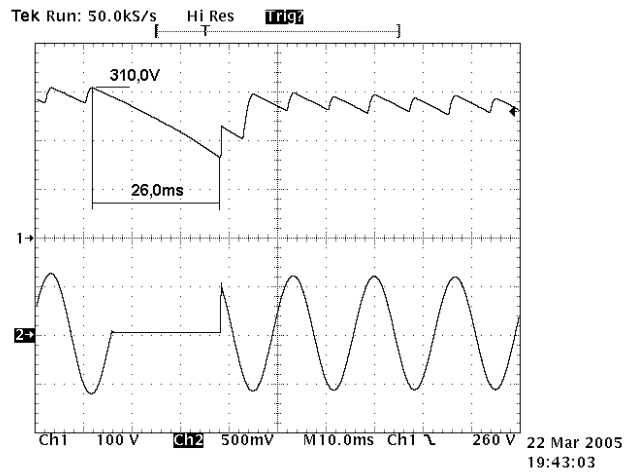


Figura 5.51 - $v_c(t)$ Obtido Depois da Troca do Capacitor (C_{AD}) no Microcomputador.

O valor observado para o $t_{m\acute{a}x}$ do ensaio, Figura 5.51, é muito próximo do esperado e calculado, validando os modelos e parâmetros relevantes a VTCDs.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões Finais

Deste trabalho pode-se observar que o tratamento de VTCDs ainda é um tema controverso e com muitos pontos duvidosos. As atuais referências normativas apresentam convergências bem claras, que são as normas americanas e européias. As referências normativas de outros países por consequência acabam seguindo uma delas, como é o caso da norma e recomendações brasileiras.

Sendo assim, este trabalho busca evidenciar as condições nas quais a metodologia da M&D é aplicável (VTCDs com perfil retangulares) demonstrando as deficiências e equívocos resultantes caso seja usada para a caracterização de impacto em cargas de forma generalizada.

Apesar das normas americanas apresentarem-se mais avançadas em diversos pontos principalmente no que tange à confrontação de curvas de referência para fabricantes (limites de tolerância, por exemplo: ITIC e a SEMI F47) frente a VTCD, o presente trabalho mostrou que a aplicação da M&D para eventos da rede a essas curvas de referência é equivocado, isto porque os equipamentos abrangidos por essas normas são equipamentos eletrônicos e de modo geral alimentados por uma fonte CC, ou seja, não respondem pelo valor eficaz da tensão, mas sim pela dinâmica do filtro capacitivo $v_c(t)$.

A classificação e caracterização de VTCD e o impacto que causam nas cargas dos consumidores devem sempre observar estudos que correlacionem o comportamento das cargas frente aos distúrbios, não se limitando ao estudo exclusivamente do evento, ou o estudo das

cargas de modo puramente empírico, sem relacionar os perfis observados nos ensaios com modelos que expliquem seu comportamento frente a esses distúrbios.

O desenvolvimento de metodologias para medição quantitativa e qualitativa de VTCDs também deve se limitar a famílias de cargas com características semelhantes. Uma metodologia geral não irá caracterizar, todos os consumidores, podendo se tornar pouco ou nada representativa para avaliação de impacto de VTCDs, gerando dúvida para consumidores e concessionárias quando da monitoração de um evento e do impacto real sobre as cargas.

Assim, baseada nos modelos propostos e nas técnicas de extração dos parâmetros relevantes à VTCD, a apresentação da metodologia da Resposta do Filtro Capacitivo permite caracterizar o impacto em cargas eletrônicas alimentadas por fontes CC. Permite também verificar se a resposta da carga eletrônica atende ou não às curvas ITIC e SEMI F47.

Adicionalmente essa metodologia também apresenta boa resposta na caracterização de transitórios menores que 1 ciclo da fundamental, uma vez que busca representar o comportamento real da carga.

Um ponto não abordado é que a dinâmica das cargas alimentadas pela fonte CC pode alterar o valor de $t_{máx}$. A variação da temperatura também pode afetar o valor de $V_{mín}$.

A utilização das técnicas apresentadas para extração dos parâmetros de equipamentos eletrônicos frente a VTCD mostra, na Forma Direta, elevada precisão para caracterizar o equipamento em ensaio e uma reprodutibilidade muito boa e muito próxima do equipamento real, porém sua grande desvantagem é a necessidade de se intervir no interior do equipamento, o que não é desejável pelo usuário final do equipamento. Essa técnica pode ser facilmente utilizada pelos fabricantes dos equipamentos sem grandes custos e, assim, os mesmos poderiam fornecer os limites de tolerância dos equipamentos fabricados por eles.

A extração por Forma Indireta, apesar de não ser tão precisa como a Forma Direta, é válida para levantamento dos parâmetros relevantes a afundamentos de tensão. Ficou demonstrado que tal metodologia pode ser muito útil, principalmente quando se deseja conhecer os limites de tolerância a afundamento de tensão e não se pode intervir no equipamento em teste. Essa técnica pode ser utilizada pelo usuário final dos equipamentos, as concessionárias, as indústrias e setores comerciais com processos sensíveis e que desejarem caracterizar suas plantas quanto a afundamentos de tensão.

6.2 Principais Contribuições deste Trabalho

O que foi apresentado neste trabalho procurou evidenciar no estudo de VTCDs, os seguintes pontos:

- Formulação de duas metodologias para extração direta e indireta de parâmetros relevantes ao estudo de VTCD;
- Proposição de modelos para a simulação de impacto de VTCD para cargas alimentadas através de fontes CC.
- Identificação da curva de carga e descarga do filtro capacitivo da fonte CC como parâmetro relevante na definição da susceptibilidade da carga a VTCD;
- Estudo de cargas reais, consideradas vulneráveis a VTCDs;
- Destaque aos riscos da aplicação indevida da metodologia da M&D aos limites com ITIC e SEMI F47 para eventos que não sejam retangulares;

6.3 Trabalhos Futuros

Do universo de estudo de VTCDs, pode-se destacar as seguintes possibilidades:

- Implementar um sistema de medição de QEE que também utilizasse a metodologia da Resposta do Filtro CC, melhorando os modelos apresentados.
- Estender os estudos para outros tipos de cargas e processos, para levantamento dos parâmetros relevantes a afundamentos de tensão.
- Aprofundar os estudos em elevações de tensão e seu real impacto sobre as cargas dos consumidores.
- Propor metodologias para determinar os limites de tolerância para uma família de cargas de modo a equacionar a relação entre fabricantes de equipamentos e concessionárias.
- Desenvolver os estudos com o objetivo de identificar e modelar as principais fontes causadoras de VTCD.
- Desenvolver os estudos na mitigação das VTCDs que sejam menos custosas que as soluções tradicionais utilizadas.
- Aprofundar os estudos na propagação de VTCDs em plantas industriais, nas redes das concessionárias, entre outros.

Referências Bibliográficas

- [1] Bollen, M. H. J.; "Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press Series On Power Engineering, New York, 2000.
- [2] Dugan, C. R.; McGranaghan, M. F.; Santoso, S.; Beaty, H. W.; "Electrical Power Systems Quality", Ed. McGraw Hill, 2003.
- [3] Deckmann, S. M.; "Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica", Curso de Extensão, 2002, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [4] Mohan, N.; Undeland, T. M.; Robbins, W. P.; "Power Electronics – Converters, Applications and Design", Ed. Jon Wiley & Sons, 2ª edição.
- [5] Desoer, C. A.; Kuh, E. S.; "Basic Circuit Theory", Ed. McGraw-Hill, 1969.
- [6] Orsini, L. Q.; "Circuitos Elétricos"; Ed. da Universidade de São Paulo (Edusp); 1975.
- [7] Junior, Y. B.; "Circuitos Elétricos", Ed. da Universidade Estadual de Campinas, 1991.
- [8] Cunha, M. C. C.; "Métodos Numéricos", Ed. da Universidade Estadual de Campinas, 2ª edição, 2003.
- [9] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.; "Fundamentos de Física 3 – Eletromagnetismo", Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 4ª edição.
- [10] Spiegel, R. Murray; "Manual de Formulas e Tabelas Matemáticas", Coleção Schaum, Ed. McGraw Hill do Brasil.
- [11] Deckman, S. M. "Variações Momentâneas de Tensão – Relatório 5 e 6", Estudos sobre Qualidade de Energia Elétrica, maio e julho, 2000.
- [12] Ferreira, A. A.; "Caracterização e Análise de Variações de Tensão de Curta Duração", dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, março, 2002.
- [13] Leborgne, R. C.; "Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão", dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá – Unifei, maio, 2003.
- [14] Samotyj, M.; Gellings, C.; Amin, M.; "Power System Infrastructure for a Digital Society: Creating The New Frontiers", Electra, n° 210, outubro, 2003.
- [15] Stockman, K.; Didden, M.; D'Hulster, F.; Belmans, R.; "Bag the Sags", IEEE Industry Applications, setembro/outubro, 2004.

- [16] Heydt, G. T.; Ayyanar, R.; Tallan R.; “Power Acceptability”, IEEE Power Engineering Review, setembro, 2001.
- [17] Ferreira, A. A.; Castro, G. P. B.; Deckmann, S. M.; “Monitoramento de Variações de Momentâneas de Tensão”, IV – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE), Porto Alegre, Brasil, 2001.
- [18] Filho, J. M. C.; Oliveira, T. C.; Leborgne, R. C.; Abreu, J. P. G.; “Análise Comparativa de Simulações e Medições de Afundamentos de Tensão.” XIV – Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Natal, Brasil, setembro, 2002.
- [19] Ferreira, A. A.; Castro, G. P. B.; Deckmann, S. M.; “Caracterização de Variações de Tensão de Curta Duração”, XIV – Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Natal, Brasil, setembro, 2002.
- [20] Leão C. A. P.; Oliveira, J. C.; Belchor, F. N.; “Estudos Computacionais sobre o Desempenho de Conversores de Frequência VSI-PWM Sob Condições de Afundamentos Momentâneos de Tensão Balanceados e Desbalanceados”, XIV – Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Natal, Brasil, setembro, 2002.
- [21] Sannino, A.; Bollen M. H. J.; Svensson, J.; “Voltage Tolerance Testing of Three-Phase Voltage Source Converters”, IEEE, 2005;
- [22] Öhrström, M.; Söder, L.; “A Comparison of Two Methods Used for Voltage Dip Characterization”; IEEE, 2003.
- [23] Pedra, J.; Corcóles, F.; Sainz, L.; “Study of AC Contactors During Voltage Sags”, IEEE, 2002.
- [24] Pohjanheimo, P.; Lehtonen, M.; “Equipment Sensitivity to Voltage Sags – Test Results for Contactors, PCs and Gas Discharge Lamps”, IEEE, 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, volume 2, outubro, 2002.
- [25] Anderson, L. M.; Bowes, K. B.; “The Effects of Power-Line Disturbances on Consumer Electronic Equipment”, IEEE Transaction on Power Delivery; Vol. 5, n° 2, abril, 1990.
- [26] Keus, A. K.; Coller, J. M.C.; Koch, R.G.; “A Test Facility for Determining the Response of Industrial Equipments to Voltage Dips (Sags)”, IEEE, 1999.
- [27] Zhang, L.; Bollen, M. H. J.; “A Method for Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips (Sags) from Recorded Voltage Wave Shapes”, IEEE, 1999.
- [28] Jewell, W.; “Power Quality Laboratory Testing”, IEEE Power Delivery Review, fevereiro, 2002.
- [29] Brooks, D. L.; Dugan, R. C.; Wacławski, M.; Sundaram, A.; “Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance”, IEEE, 1997.

-
- [30] Kyei, J.; Ayyanar, R.; Heydt, G.; Thallan, R.; Blevins, J.; “The Design of Power Acceptability Curves”, IEEE Transaction on Power Delivery, volume 17, julho, 2002.
- [31] McGranaghan, M.; Roettger, B.; ”Economic Evaluation of Power Quality”, IEEE Power Engineering Review, fevereiro, 2002.
- [32] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, “Padrões de Desempenho da Rede Básica – Submódulo 2.2”, Procedimentos de Rede, revisão 2, 2002, Brasil.
- [33] IEEE Standard 1159; “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, junho, 1995 e “IEEE Task Force p1159 – Monitoring Electric Power Quality”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, fevereiro, 2002.
- [34] CENELEC EN 50160; “Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems”, European Committee for Electro technical Standardization, 1999.
- [35] NRS 048-2; “Electricity Supply – Quality of Supply”, South African Bureau of Standards, 1996.
- [36] SEMI F47; “Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”, SEMI – Semiconductor Equipment and Material Institute.
- [37] ITI (CBEMA) curve Application Note; “Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council”; Disponível em: <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>.
- [38] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; “Resolução nº 24”, janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.
- [39] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; “Resolução nº 75”, janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>
- [40] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; “Resolução nº 505”, janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>
- [41] IEC 1000-1-1;”Electromagnetic Compatibility (EMC) Section 1: Application and Interpretation of fundamental definitions and terms”, Ed. 1992.
- [42] Luna, E. K.; Deckmann, S. M.; “Avaliação do Impacto de Variações de Tensão sobre Cargas Sensíveis”, XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2004), Gramado, Brasil, 2004.
- [43] Luna, E. K.; Deckmann, S. M.; “Real Impact of Voltage Sags and Swell on Sensible Loads”, VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais(Induscon 2004), Joinville, Brasil, 2004.

- [44] IEEE Standard 446; “IEEE Recommended Practice For Emergency And Standby Power Systems For Industrial And Commercial Applications”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, dezembro, 1995.

Apêndices

A1 – Curva de Sensibilidade CBEMA [1,2,12,13]

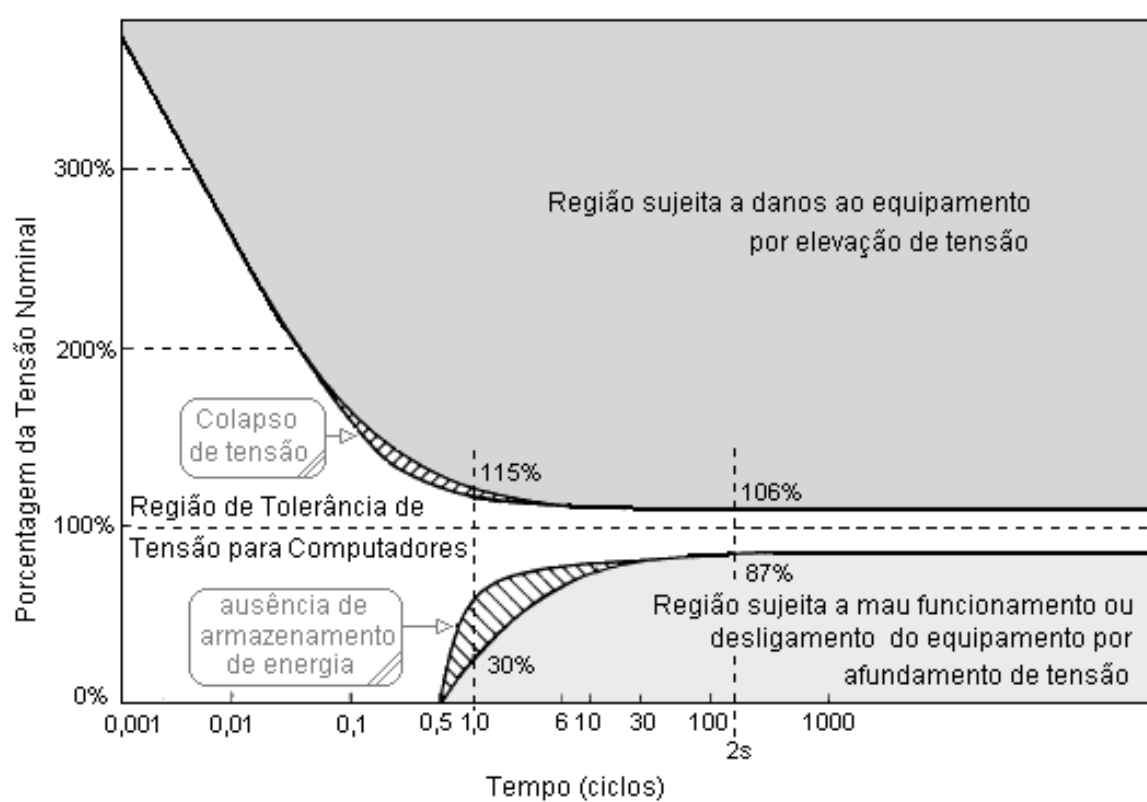


Figura A.1 – Curva CBEMA substituída pela atual ITIC (revisão de 2000)

A2 – Caracterização de VTCD

A2.1 – Perda de Tensão (P_V) [12,13]:

$$P_V = \int \left[1 - \frac{V(t)}{V_{nom}} \right] \cdot dt$$

$V(t)$ valor eficaz da tensão durante o afundamento.

V_{nom} tensão eficaz nominal no local da medição.

A2.2 – Perda de Energia (P_E) [12,13]:

$$P_E = \int \left[1 - \left(\frac{V(t)}{V_{nom}} \right)^2 \right] \cdot dt$$

$V(t)$ valor eficaz da tensão durante o afundamento.

V_{nom} tensão eficaz nominal no local da medição.

A2.3 – Método de Bollen [1,13,27]:

Tipos básicos de afundamentos de tensão:

Tabela A.1 – Tipo de Falta, Tipos de Afundamentos e Conexão da Carga

Tipos de Falta	Carga conectada em estrela (Y)	Carga conectada em delta (Δ)
3 Fases (FFF)	A	A
2 Fases (FF)	C	D
1 Monofásico (FN)	B	C*

(*) Magnitude não é igual a V e sim $(1/3)+(2/3)V$.

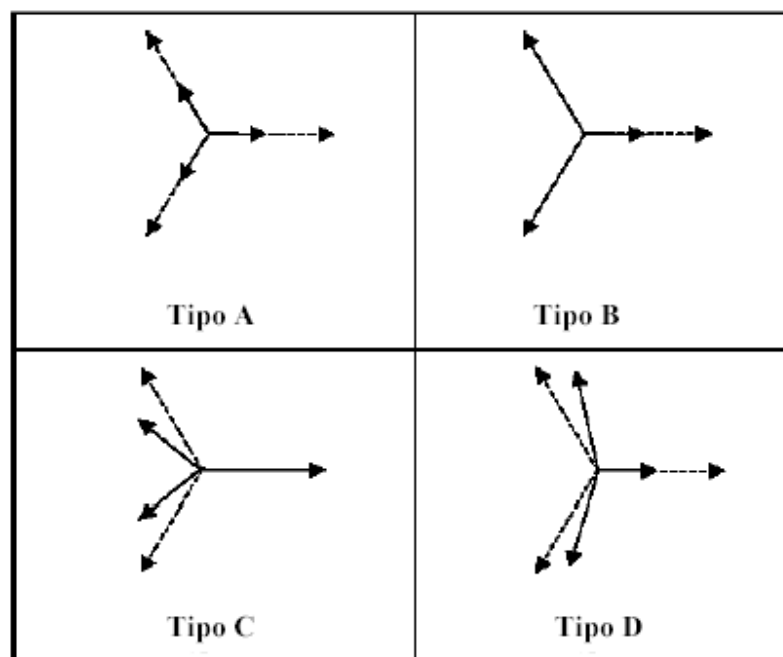


Figura A.2 – Diagrama Fasorial dos Quatro Tipos de Faltas e Afundamentos de Tensão

Tabela A.2 – Quadro Tipos de Afundamentos e Equações

Tipo A	Tipo B
$V_a = V;$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}Vj$ $V_b = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}Vj$	$V_a = V;$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}j$ $V_b = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}j$
Tipo C	Tipo D
$V_a = V;$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}Vj$ $V_b = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}Vj$	$V_a = V;$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}j$ $V_b = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}j$

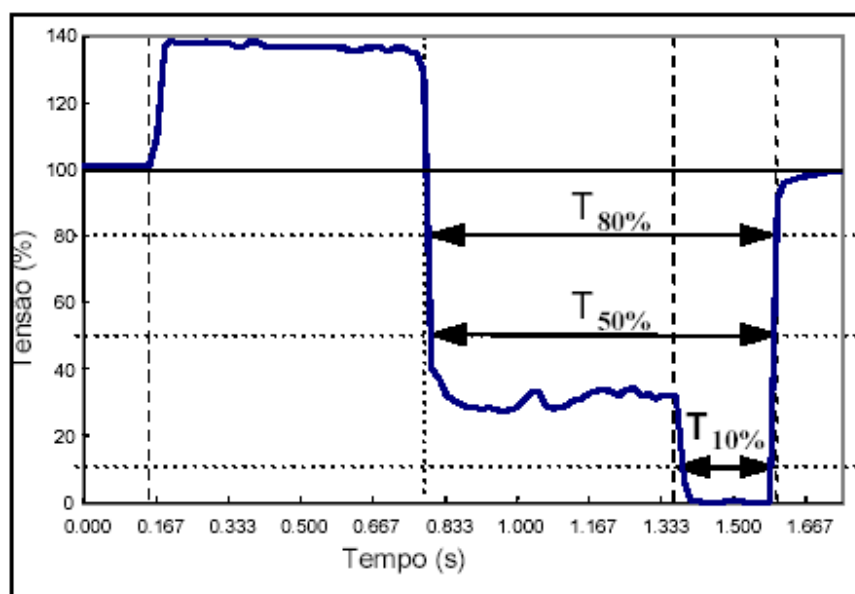
Tabela A. 3 - Transformação do Afundamento para o Lado da Baixa Tensão

Conexão do Transformador	Afundamento Tipo A	Afundamento Tipo B	Afundamento Tipo C	Afundamento Tipo D
YNyn	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Yy, Dd, Dz	Tipo A	Tipo D*	Tipo C	Tipo D
Yd, Dy, Yz	Tipo A	Tipo C*	Tipo D	Tipo C

(Y,y) Conexão em Y; (D, d) Conexão em Δ ; (z) Conexão zig-zag.

A2.4 – Método de EPRI/Electrotek [12,13,29]:

Metodologia similar a M&D, porém observando-se caracterizando o evento em vários níveis de tensão, na Figura A.3, o afundamento é caracterizado pela magnitude de duração em 3 níveis de tensão 80%, 50% e 10%


Figura A.3 – Caracterização de um Afundamento de Tensão Não Retangular.

A3 - Ponteira Diferencial do Osciloscópio



Escala	1300V	130V
Modo Comun	+/- 1000V	+/- 1000V
Osciloscópio V/Div	V/Div Efetivo	
1	500	50
0,5	250	25
0,2	100	10
0,1	50	5
50m	25	2,5
20m	10	1
10m	5	0,5
5m	2,5	0,25
2m	1	0,1

(a)

(b)

Figura A. 4 - (a) Ponteira Diferencial Utilizada nos Ensaio de Laboratório
(b) Tabela de Conversão de Escala Osciloscópio e Ponteira Dieferencial

A4 – Trabalhos Publicados

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO SOBRE CARGAS SENSÍVEIS

ERNESTO K. LUNA, SIGMAR M. DECKMANN

*Depto. de Sistema e Controle de Energia, Universidade Estadual de Campinas
Caixa Postal 6101, 13083-852 Campinas, SP, Brasil*

E-mail: maverick@dsce.fee.unicamp.br, sigmar@dsce.fee.unicamp.br

Abstract - Voltage sags impacts on sensible loads are usually analyzed from the *event* point of view and are quantified according the Magnitude vs. Duration methodology. The aim of this paper is to analyze the impact of a voltage sag from the *load* point of view and to show that wrong conclusions can be drawn from the traditional Magnitude-Duration method about the real causes of equipment failures or industrial process interruptions.

Keywords - Power Quality, Voltage sags, Tolerance Curve, CBEMA/ITIC limits.

Resumo - Os impactos de afundamentos temporários de tensão sobre cargas sensíveis são analisados tradicionalmente do ponto de vista do *evento*, e quantificados segundo a metodologia da Magnitude e Duração. O presente artigo pretende analisar o impacto de um afundamento de tensão do ponto de vista da *carga* e mostrar que determinados eventos, analisados segundo essa metodologia, podem levar a conclusões equivocadas acerca da verdadeira causa da falha de equipamentos ou interrupções de processos industriais.

Palavras-chave - Qualidade de Energia, Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD), Curva de Tolerância, Limites CBEMA/ITIC.

1 Introdução

Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), que incluem elevações e afundamentos temporários de tensão, são os eventos que mais comumente causam prejuízos materiais e financeiros, principalmente devido à interrupção (parcial ou total) de processos industriais, centros de processamento de informações (CPI's) e de dados (CPD's).

A análise de VTCD's é atualmente baseada na metodologia da Magnitude e Duração do evento e aplicada a uma curva de tolerância, ITIC[1], ilustrada na Figura 1.

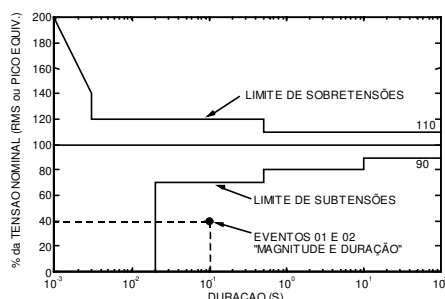


Figura 1 - Curva CBEMA/ITIC para variações de tensão.

De acordo com essa norma, qualquer variação de tensão é classificada em função da máxima violação da tensão de referência ($V_{ref.}$) e do tempo que a tensão violou esse valor de referência, como mostrado nos eventos 01 e 02 (Figuras 2 e 3). Não é levada em consideração a evolução temporal dos eventos, nem as características das cargas. Portanto, essa metodologia caracterizaria os eventos 01 e 02 como tendo as mesmas coordenadas na curva ITIC. Esse ponto está assinalado na Figura 1.

Como será mostrado, a não observação da evolução temporal do evento pode levar a conclusões errôneas do impacto do evento em cargas sensíveis.

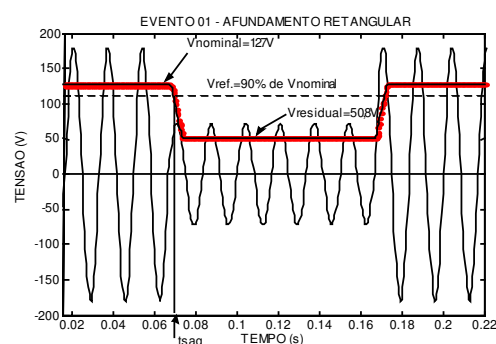


Figura 2 -Evento 01 - Afundamento retangular.

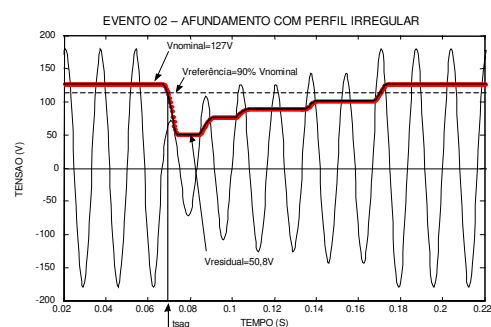


Figura 3 - Evento 02 - Afundamento em degraus.

Parece óbvio que o impacto do evento 01 sobre uma carga é maior que o do evento 02 devido à recuperação parcial da tensão.

Para esclarecer melhor essas aparentes discrepâncias, será necessário analisar as características de cargas, chamadas sensíveis, por serem vulneráveis a eventos de sub e sobre-tensão. Tais cargas, em geral, são equipamentos que apresentam um conversor de tensão CA-CC na entrada da alimentação, contendo armazenadores passivos de energia como capacitores e indutores, que afetam a resposta frente a um distúrbio na tensão da rede.

2 Parâmetros de uma Carga Sensível

Devido à presença de componentes eletrônicos semi-condutores em conversores e processos de análise e controle, tornam as cargas que utilizam tais conversores altamente dependentes do bom funcionamento desses componentes. São exemplos de cargas sensíveis: microcomputadores, PLC's, servidores, equipamentos ligados a processos industriais e ao controle da informação (CPI's e CPD's), além de equipamentos médicos.

Frete a um afundamento temporário de tensão, as cargas sensíveis podem ser caracterizadas por três parâmetros básicos, que podem ser obtidos através de ensaios de laboratório:

Limite de Tensão Mínima ($V_{\min}$): a mínima tensão em regime permanente que a carga sensível suporta sem ocorrer mau funcionamento ou desligamento.

Limite de Duração Máxima ($t_{\max}$): a máxima duração de um evento, durante o qual a tensão pode ficar abaixo do valor mínimo ($V_{\min}$), supondo tensão inicial nominal.

Curva de Descarga: característica de descarregamento dos elementos armazenadores de energia (normalmente capacitores) e que é função do tipo de carga conectada ao mesmo: *Impedância Constante*; *Corrente Constante*; *Potência Constante*.

3 Características da Curva de Descarga

Por serem compostas predominantemente de componentes eletrônicos, as cargas sensíveis necessitam de um conversor ou "fonte interna" para seu funcionamento: em geral utilizam conversores CA-CC. Basicamente existem dois tipos de fontes internas: fontes reguladas (lineares) ou fontes controladas (chaveadas).

Para suavizar a conversão CA-CC são necessários filtros de entrada e/ou saída, que constituem os elementos armazenadores de energia contendo indutores e/ou capacitores. Em caso de afundamento temporário de tensão na entrada, esses elementos armazenadores garantem sobrevida de uma carga sensível através da descarga gradual dos mesmos. A característica de descarga é determinada pelo tipo de regulador e de carga conectada.

Cargas alimentadas através de fontes reguladas (lineares) em geral podem ser caracterizadas como impedância constante ou corrente constante.

Cargas alimentadas através de fontes controladas (chaveadas) em geral podem ser caracterizadas como potência constante.

3.1 Curva de Descarga para Impedância Constante

Após o início do afundamento da tensão de entrada, a descarga do capacitor para um circuito de impedância constante segue a regra de um circuito RC simples (figura 4.a). A tensão decai exponencialmente, caracterizada pela constante RC do circuito, equação (1).

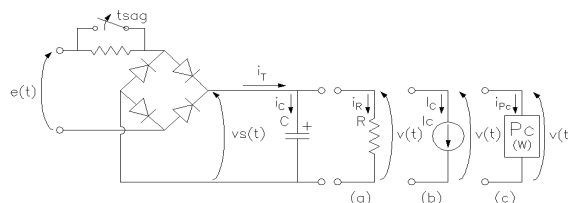


Figura 4 (a) Modelo para Impedância Constante, (b) Modelo para Corrente Constante, (c) Modelo para Potência Constante.

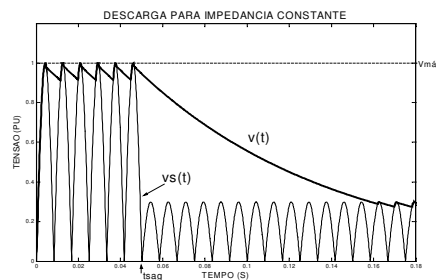


Figura 5 - Descarga com Característica de Impedância Constante

$$v(t) = V_{\max} \cdot e^{-t/RC} \quad \text{para } t > tsag(1)$$

Circuitos com característica simples como a da Figura 5 dificilmente representam cargas eletrônicas reais. Na verdade, a maioria dos circuitos apresenta característica de descarga composta.

3.2 Curva de Descarga para Corrente Constante

Neste caso, após o afundamento da tensão de entrada, o capacitor percebe uma carga similar a uma fonte que absorve corrente constante (I_c), conforme Figura 4.b, e o perfil de descarga para este caso é um decaimento linear da tensão do capacitor até o novo nível da tensão de entrada. Partindo-se de uma condição de carga inicial do capacitor (Q_0) temos, equação (2):

$$Q_0 = C \cdot V_{\max} \quad (2)$$

Sabendo-se que a carga solicita uma corrente constante I_c , resulta a equação (3):

$$q(t) = Q_0 - I_c \cdot t = C \cdot v(t) \quad (3)$$

Logo, obtemos a equação (4) como característica de descarga do capacitor para uma carga de corrente constante (Figura 6):

$$v(t) = V_{\max} - \frac{I_c \cdot t}{C} \quad t > tsag \quad (4)$$

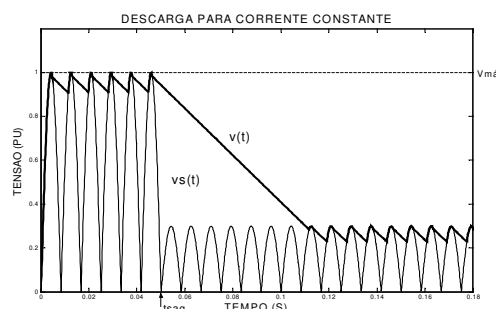


Figura 6 - Descarga com Característica de Corrente Constante.

Este tipo de carga, Corrente Constante, é encontrado em reguladores simples e a solicitação de corrente constante é imposta pelos elementos semicondutores como leds, drivers, buffers, memórias, cpu's.

3.3 Curva de Descarga para Potência Constante

A descarga do capacitor após o afundamento da tensão de entrada, neste caso, ocorre drenando potência constante (P_C), conforme indicado na Figura 4.c. Esse processo se dá porque o conversor tenta compensar o decaimento da tensão aumentando a corrente suprida à carga para manter a potência constante. O decaimento da tensão neste caso é extremamente rápido. Considerando que o capacitor está com energia inicial (E_0), conforme equação (5):

$$E_0 = \frac{1}{2} C \cdot V_{\max}^2 \quad (5)$$

e sabendo que a carga consome uma potência constante, resulta a equação (6) de energia do capacitor,

$$E(t) = E_0 - P_C \cdot t = \frac{1}{2} C \cdot V_{\max}^2 - P_C \cdot t = \frac{1}{2} C \cdot v^2(t) \quad (6)$$

de onde obtemos a equação (7), de descarga do capacitor para uma carga de potência constante (Figura 7):

$$v(t) = \sqrt{V_{\max}^2 - \frac{2 \cdot P_C \cdot t}{C}} \quad t > tsag. \quad (7)$$

Na Figura 4.c, o bipolo representado como (P_C) é composto de um circuito regulador controlado (controle da fonte chaveada) sendo o sistema eletrônico a carga sensível.

Fontes chaveadas apresentam decaimento inicial de potência constante e, abaixo de determinado nível, tendem para corrente ou impedância constante.

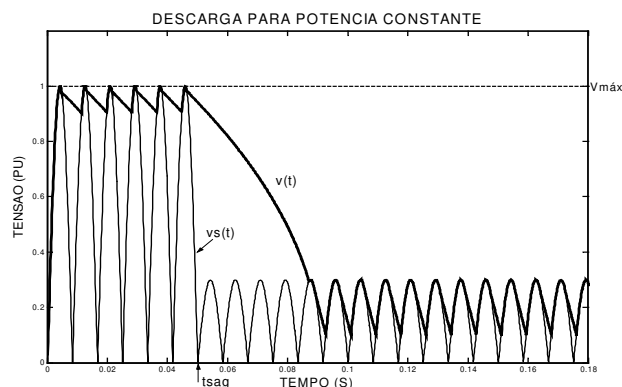


Figura 7 - Descarga com Característica de Potência Constante

4 Curva de Tolerância ou de Sensibilidade

Para se determinar o impacto de um afundamento temporário da tensão sobre uma carga sensível é necessário, portanto, conhecer as características da carga.

A curva de tolerância ou sensibilidade a afundamentos de tensão pode ser determinada através de ensaio do equipamento (carga sensível). Como mostrado na Figura 8, ela é composta de três partes, estabelecendo três regiões bem definidas: a Região de Operação Normal, a Região de Afundamento Tolerável e a Região de Desligamento.

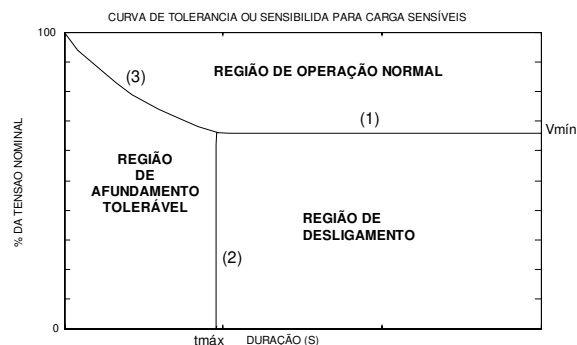


Figura 8 - Curva de Tolerância a Subtensões

- (1) Limite de Tensão Mínima ($V_{\min}$)
- (2) Limite de Duração Máxima Tolerada ($t_{\max}$)
- (3) Curva de Descarga da Fonte CA-CC

4.1 Região de Operação Normal

Por Região de Operação Normal entende-se a região delimitada pelo Limite de Tensão Mínima ($V_{\min}$) que garante a operação da carga e a Curva de Descarga da fonte CA-CC da mesma.

A principal característica da Região de Operação Normal é que um evento com perfil de evolução temporal qualquer, permanecendo acima da tensão mínima ($V_{\min}$), não afeta o funcionamento da carga. Nesta região, o evento pode ter duração ilimitada, que não deve ocorrer desligamento da carga.

4.2 Região de Afundamento Tolerável

A Região de Afundamento Tolerável é delimitada pela Curva de Descarga da fonte CA-CC e o Limite de Duração Máxima Tolerada ($t_{\max}$).

Na Região de Afundamento Tolerável um evento pode ter qualquer perfil de evolução temporal, podendo a tensão chegar ao nível zero (interrupção), porém o tempo que a tensão pode estar abaixo de $V_{\min}$ está limitado pelo Limite de Duração Máxima Tolerada ($t_{\max}$). Dentro desses limites a carga sensível não deve sofrer desligamento.

4.3 Região de Desligamento

Finalmente, a Região de Desligamento é delimitada pelo Limite de Tensão Mínima ($V_{\min}$) e o limite de Duração Máxima Tolerada ($t_{\max}$). Um evento que adentre esta região causará mau funcionamento da carga com perda parcial de informações e funções, ou o desligamento do equipamento com perda total das funções e informações.

Importante observar que o Limite de Duração Máxima Tolerada está intrinsecamente ligado ao Limite de Tensão Mínima e à Curva de Descarga. O ponto onde essas curvas se cruzam determina o tempo de desligamento de uma carga-sensível (Limite de Duração Máxima Tolerada - $t_{\max}$).

5 Eventos que Afetam Cargas Sensíveis

Para um evento qualquer, com tensão inicial nominal, o que determina se irá ocorrer o desligamento da carga é o nível da tensão que a fonte interna atinge após a Duração Máxima Tolerada ($t_{\max}$). Se a tensão da fonte interna após $t_{\max}$ for inferior a $V_{\min}$, irá ocorrer desligamento.

Na Figura 9 tem-se um exemplo de um evento que não causaria impacto sobre uma carga sensível. Notar pelos parâmetros anteriormente citados: tensão mínima ($V_{\min}$), duração ($t_{\max}$) e curva de descarga, que se trata de uma carga tipo impedância constante.

Nesse evento, o primeiro patamar do afundamento de tensão (compreendido entre 0,1s e 0,2s) está na Região de Afundamento Tolerável.

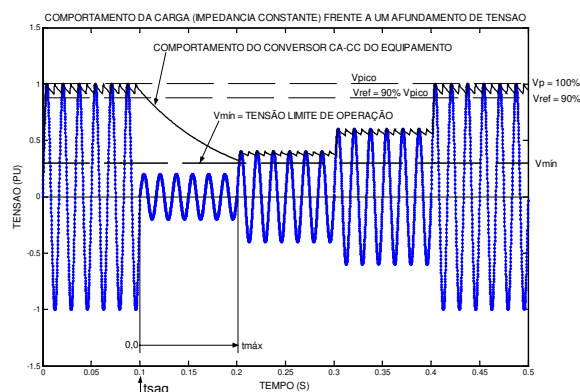


Figura 9 – Afundamento que não causa Desligamento

Os outros dois patamares do afundamento de tensão (compreendidos entre 0,2s e 0,4s) estão na Região de Operação Normal. Neste caso a tensão da fonte ficou acima de $V_{\min}$, não ocorrendo desligamento, apesar do evento durar muito mais que $t_{\max}$.

Na Figura 10 temos outro evento, que ao contrario do evento da Figura 9, causaria desligamento da carga.

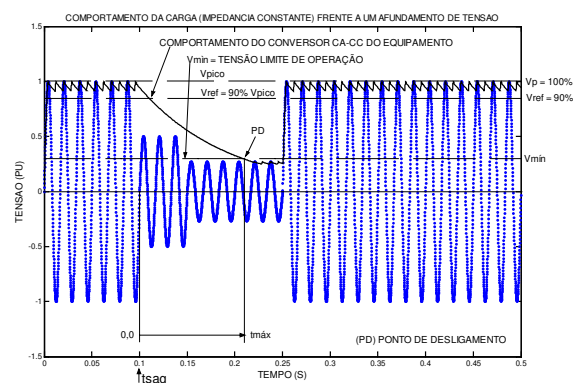


Figura 10 - Afundamento causando Desligamento.

O primeiro patamar do afundamento (compreendido entre 0,1s e 0,15s) está na Região de Afundamento Tolerável.

O segundo patamar do afundamento de tensão está em duas regiões, a Região de Afundamento Temporário e a Região de Desligamento. O intervalo em que o segundo patamar se inicia até o ponto de cruzamento (PD) da curva de descarga com o limite de tensão mínima ($V_{\min}$) é a Região de Afundamento Tolerável. Do ponto de cruzamento até o fim do evento tem-se a Região de Desligamento. Neste caso, a tensão da fonte fica abaixo da tensão $V_{\min}$ e, por isso ocorre o desligamento.

Pela metodologia de Magnitude e Duração, o evento da Figura 9 ($V_{\min}=20\%$, duração=0,3s) seria considerado mais severo que o da Figura 10 ($V_{\min}=27\%$, duração=0,15s).

Portanto, há evidente necessidade de melhorias na forma de avaliação dos impactos de VTCD's, levando em conta o real efeito sobre as cargas.

6 Valor Eficaz versus Valor de Pico

A metodologia de Magnitude e Duração utiliza o valor eficaz (V_{ef}) para caracterizar um afundamento temporário de tensão. O cálculo do valor eficaz pode ser obtido pela aplicação de uma janela móvel de amostras de pelo mesmo meio ciclo da componente fundamental (60Hz) e é dada por:

$$V_{\text{ef}}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [v(k-i)]^2} \quad (8)$$

onde, N = número de amostras da janela,
 $v(k)$ = k-ésima amostra da tensão.

Em geral as fontes que alimentam cargas sensíveis respondem ao valor de pico da tensão (V_p) e não ao valor eficaz da tensão. Nestes casos a utilização do valor eficaz da tensão pode gerar erros na avaliação de impactos de afundamentos temporários de tensão, como será mostrado nos itens seguintes.

6.1 Erro de Avaliação devido a Surto de Tensão

Um surto de tensão é caracterizado por uma rápida elevação na tensão com duração menor que meio ciclo da fundamental (60Hz). A Figura 11 mostra um surto, seguido de um afundamento de tensão.

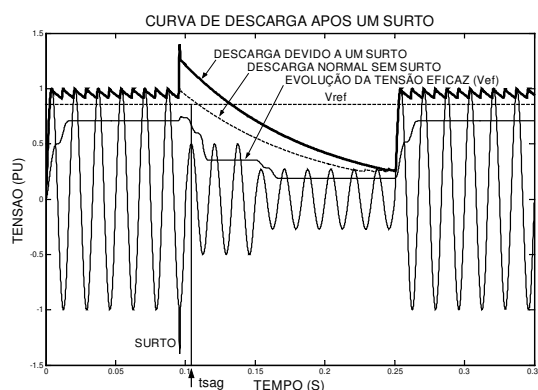


Figura 11 – Efeito de um surto no início de um afundamento.

Uma vez que o valor eficaz é uma média quadrática aplicada no mínimo a meio ciclo da fundamental, o surto é praticamente absorvido pelo cálculo do valor eficaz.

Assim teríamos um significativo erro na avaliação do impacto do afundamento de tensão baseado no valor eficaz, ao contrário do que ocorre com o valor de pico, onde o surto modifica a tensão inicial da fonte interna, responsável pela característica de descarga do capacitor, conseqüentemente alterando o ponto de cruzamento da curva de descarga com o limite mínimo de tensão ($V_{\min}$) e, portanto, o ponto de desligamento da carga.

6.2 Erro de Avaliação devido a Harmônicas

Componentes harmônicos também são fatores que podem gerar erros de interpretação de um afundamento de tensão para cargas sensíveis, quando utilizamos o valor eficaz da tensão.

Para ilustrar, a Figura 12 mostra um sinal contendo, além da fundamental, uma harmônica de quinta ordem com amplitude de 20% da fundamental e fase inicial zero (0°).

Na Figura 13, o sinal é o mesmo da Figura 12, porém com a fase da harmônica invertida. O primeiro ponto a ser observado é que componentes harmônicos alteram a curva de descarga, devido à influência no valor de pico da onda. A consequência disto é a alteração no cruzamento da curva de descarga com o limite de tensão mínima (ponto de desligamento). Como se vê, até mesmo a fase da harmônica afeta a curva de descarga do capacitor do conversor.

O segundo ponto está relacionado ao valor eficaz da tensão. Os sinais das Figuras 12 e 13 apresentam o mesmo valor eficaz da tensão, e por esse critério (V_{ef}), o impacto dos dois afundamentos seria considerado equivalente, mas ambos tem características diferentes, vistas pelo valor de pico (V_p).

Portanto, observando-se as características de uma carga sensível, percebe-se que a correta avaliação de um afundamento de tensão se dá pelo valor de pico e não pelo valor eficaz da tensão.

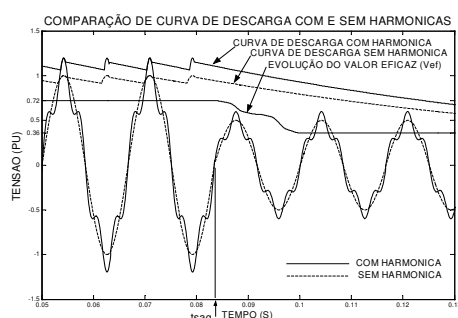


Figura 12- Fundamental mais 5ª Harmônica com fase 0° .

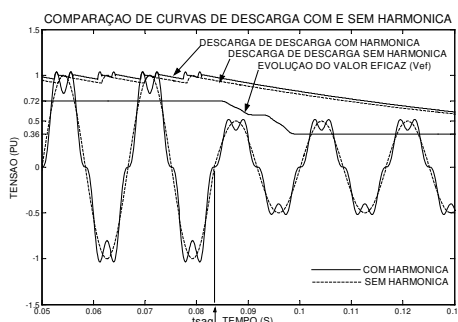


Figura 13 - Fundamental mais 5ª Harmônica com fase 180° .

7 Aplicação para Duas Cargas Sensíveis

Para testar a validade das considerações anteriores, foram ensaiadas duas cargas sensíveis típicas e de uso comum: um rádio-relógio digital (marca Lenox Sound) e um microcomputador (PC), 64Mbytes de memória, processador Pentium MMX de 200MHz (sem marca). Ambos foram testados para tensão pré-evento nominal (127V).

A bancada de ensaio era composta de: 1 fonte CA de 4,5KVA - Gerador de ondas arbitrárias (mod. 4500iL - Califórnia Instruments), 1 plataforma de aquisição de dados A/D de 4 canais de 2400Hz, 0 - 220V, um microcomputador para controle da fonte e do sistema de aquisição.

7.1 Curva de Tolerância do Rádio-Relógio Digital

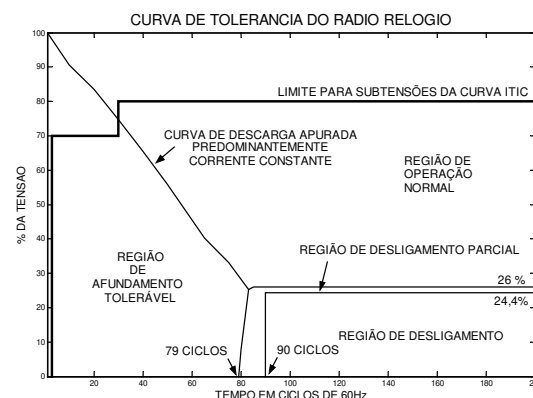


Figura 14 - Curva de Tolerância do Relógio Digital.

O relógio digital (sem ativar o rádio) apresentou uma Região de Desligamento Parcial, contida na Região de Desligamento. Notar que o relógio comporta-se como carga tipo Corrente Constante (curva de descarga linear), Figura 14.

7.2 Curva de Tolerância do Microcomputador

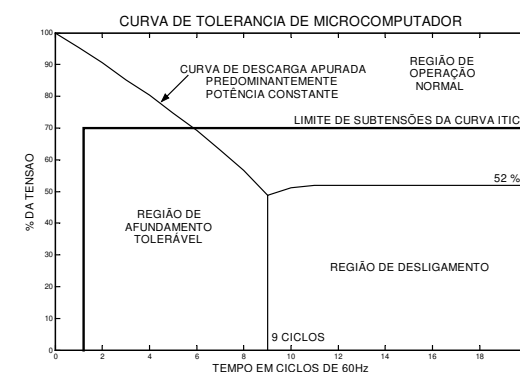


Figura 15 - Curva de Tolerância do Microcomputador

O microcomputador é suprido através de uma fonte chaveada e de acordo com a Figura 15, sua curva de descarga tende para Potência Constante.

7.3 Testes de Afundamento nas Cargas Testadas

Diversos eventos, compostos por afundamentos sucessivos com diferentes magnitudes e durações, foram programados na fonte Califórnia e aplicados ao rádio-relógio e ao microcomputador a fim de avaliar o real impacto causado. O objetivo foi verificar se as curvas de tolerância levantadas (Figuras 14 e 15) para as duas cargas de fato representam os limites de suportabilidade para eventos de afundamento de tensão dessas cargas.

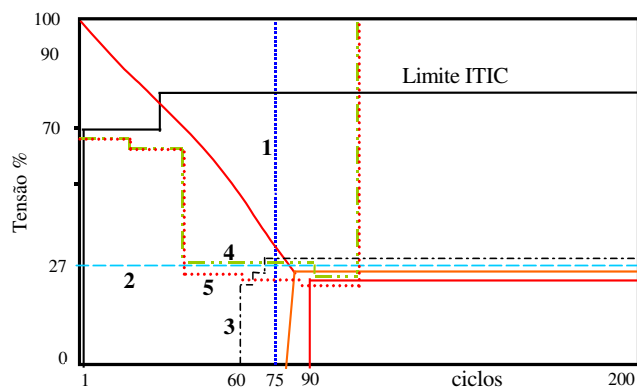


Figura 16 - Eventos programados para testar a curva de tolerância do rádio-relógio

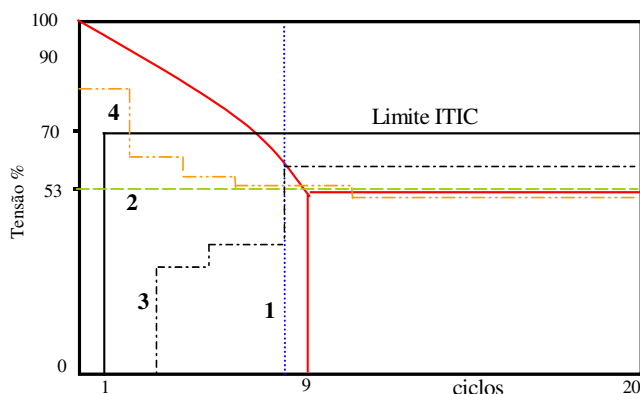


Figura 17 - Eventos programados para testar a curva de tolerância do microcomputador

Notar que nos dois casos apenas os eventos que adentraram a carga, validando, portanto, os modelos propostos para as curvas de tolerância. A metodologia da Magnitude e Duração (baseado na ITIC), por outro lado, mostrou-se extremamente conservativa e pouco representativa do impacto causado sobre a carga. No caso, por exemplo, do evento 3, nas duas tabelas temos profundas violações da curva ITIC, quando na verdade as cargas não sofreram desligamento.

8 Conclusão

A análise de impacto de afundamentos de tensão não deve-se restringir à análise do evento visto pelo lado da rede.

Deve-se observar também o comportamento das cargas envolvidas, que podem ou não ser sensíveis a eventos, do tipo afundamento de tensão. Isto coloca a necessidade de se parametrizar as cargas quanto a distúrbios de VTCD's.

Do ponto de vista do consumidor, interessa saber se a causa de uma parada de sua linha de produção foi ou não provocada pela variação da tensão da rede. Do ponto de vista da concessionária, interessa conhecer a real vulnerabilidade das cargas supridas, para decidir sobre investimentos na área de qualidade da tensão de fornecimento.

A análise crítica das metodologias tradicionais é necessária para que sejam evidenciadas as deficiências das mesmas, mostrando como se pode introduzir melhorias na caracterização do impacto de distúrbios de VTCD's.

Tabela 1 Diagnóstico resultante para o Rádio-relógio

Evento	Magn. %	Duração ciclos	Diagnóstico ITIC	Impacto Real
1	0	75	Viola	Não Desliga
2	27	200	Viola	Não Desliga
3	0	200	Viola	Não Desliga
4	25	100	Viola	Desliga Parcial
5	20	100	Viola	Desliga Total

Tabela 2 Diagnóstico resultante para o Microcomputador.

Evento	Magn. %	Duração ciclos	Diagnóstico ITIC	Impacto Real
1	0	8	Viola	Não Desliga
2	53	20	Viola	Não Desliga
3	0	20	Viola	Não Desliga
4	50	20	Viola	Desliga

Agradecimentos

O aluno Ernesto K. Luna conta com bolsa de Mestrado Capes, pelo que agradece o apoio recebido para esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- [1] ITIC (CBEMA) Curve Application Note. "Technical Committee 3 of the Information Technology Industry Council".
<http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>.
- [2] M. H. J. Bollen, "Voltage Sags in Three-Phase Systems", IEEE - Power Engineering Review n. 9, Sept. 2001
- [3] M. McGranaghan, B. Roetger, "Economic Evaluation of Power Quality", IEEE - Power Engineering Review n. 2, Feb. 2002.
- [4] G. T. Heydt, R. Ayanar, R. Thallan, "Power Acceptability", IEEE - Power Engineering Review n. 9, Sept. 2001.

Ernesto K. Luna
University of Campinas - Unicamp
maverick@dsce.fee.unicamp.br

Sigmar M. Deckmann
University of Campinas - Unicamp
sigmar@dsce.fee.unicamp.br

Abstract — Impacts of voltage sags and swells on sensible loads are usually analyzed from the system event point of view and evaluated according the Magnitude vs. Duration methodology. The aim of this paper is to analyse the impact of a voltage sag and swell from the load point of view, in order to show that wrong conclusions can be drawn about the real causes of equipment failures or industrial process interruptions if only the system events characteristics are considered.

Key words — Power Quality; Voltage Sags and Swells; Supply Interruptions; Load Sensitivity; Tolerance Curves; CBEMA/ITIC Limits.

I. INTRODUÇÃO

Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's) são os eventos que mais comumente causam prejuízos materiais e financeiros aos consumidores, principalmente devido à interrupção de processos industriais, desligamento de centros de processamento de informações (CPI's) e de dados (CPD's) [1,2]. O que essas e outras cargas, consideradas sensíveis a VTCD's, tem em comum é que são constituídas de componentes eletrônicos, os quais devem ser alimentados com tensões contínuas, obtidas através de conversores CA-CC. Esses conversores normalmente possuem filtros capacitivos na saída, para redução do "ripple" da tensão CC, e que também funcionam como armazenadores temporários de energia. Como será mostrado, o impacto dos eventos da rede sobre as cargas depende significativamente da interação entre esse "buffer" de energia e as cargas supridas.

II. ANÁLISE DE VTCD'S

Em geral, a análise de VTCD's é baseada na metodologia da Magnitude da Tensão Remanescente (M) e da Duração do Evento (D) ocorrido na rede, e aplicada a curvas de tolerância, definidas em normas tais como CBEMA/ITIC [3,4], que se aplicam a fabricantes de equipamentos de informática e de informação.

De acordo com a técnica de M&D do evento as variações dos valores *eficazes* das tensões são avaliados e os eventos são classificados em função da máxima violação da faixa aceitável (em geral definida entre 90% e 110% da tensão nominal), e do tempo (em ciclos) que a tensão permaneceu fora dessa faixa.

Esta metodologia não leva em consideração a maneira como a tensão efetivamente se comportou durante o evento, nem as características das cargas envolvidas.

Pretende-se mostrar que a não observância da evolução temporal dos eventos pode levar a conclusões equivocadas acerca do real impacto dos eventos da rede sobre as cargas.

Pretende-se também propor a análise de impacto através das curvas de tolerância das cargas.

III. PARÂMETROS DE CARGA SENSÍVEL FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Quando uma carga, alimentada através de conversor CA-CC, é submetida a um afundamento momentâneo de tensão da rede (AMT), a sua reação vai depender de três parâmetros básicos:

Tensão Mínima ($V_{mín}$): menor tensão, em regime permanente, que a carga suporta sem apresentar mau funcionamento ou desligamento.

Duração Máxima ($t_{máx}$): máxima duração de um evento temporário, durante o qual a tensão pode ficar abaixo de $V_{mín}$, sem que a carga apresente mau funcionamento ou desligamento.

Curva de Decaimento da tensão CC: característica de decaimento da tensão de saída do conversor nos elementos armazenadores de energia do conversor (normalmente capacitores). Esse decaimento depende do tipo de carga que está sendo suprida. São considerados os três tipos mais comuns: a) impedância constante, b) corrente constante e c) potência constante, como mostrado na Figura 1:

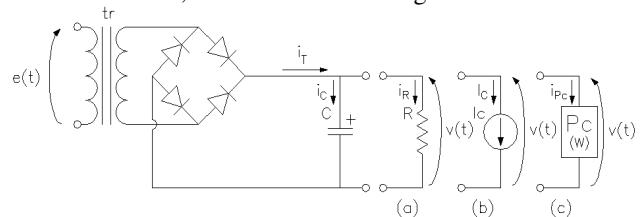


Figura 1 (a) Modelo para Impedância Constante, (b) Modelo para Corrente Constante, (c) Modelo para Potência Constante.

A. Características das Curvas de Decaimento

1. Decaimento para Impedância Constante

Após o início do afundamento da tensão de entrada, o decaimento da tensão do capacitor, alimentando um circuito de impedância constante, segue a regra de um circuito RC simples, Figura 1(a). A tensão decai exponencialmente, caracterizada pela constante RC do circuito, equação (1), e representada pela Figura 2(a):

$$v(t) = V_{max} \cdot e^{-t/RC} \quad \text{para } t > tsag \quad (1)$$

onde V_{max} é proporcional à tensão de pico da onda CA; $tsag$ indica o início do AMT.

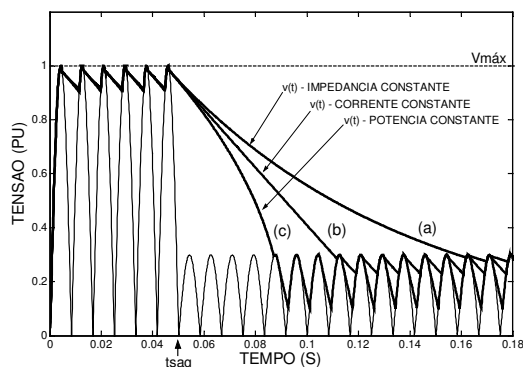


Figura 2 - (a) Decaimento com Impedância Constante,
(b) Decaimento com Corrente Constante,
(c) Decaimento com Potência Constante.

2. Decaimento para Corrente Constante

Neste caso, após o afundamento da tensão de entrada, o capacitor percebe uma carga que absorve corrente constante (I_C), Figura 1(b), e o perfil de decaimento da tensão do capacitor para este caso é linear até estabilizar no novo nível da tensão de entrada. Partindo-se de uma condição de carga inicial do capacitor ($Q_0 = C \cdot V_{max}$) e com descarga de corrente constante ($q(t) = Q_0 - I_C \cdot t = C \cdot v(t)$), obtemos a equação (2), representada na Figura 2(b):

$$v(t) = V_{max} - \frac{I_C \cdot t}{C} \quad t > tsag \quad (2)$$

Este tipo de carga, Corrente Constante, é encontrado em reguladores simples (lineares) onde a solicitação de corrente é imposta pelos elementos semicondutores tais como leds, drivers, buffers, memórias, etc.

3. Decaimento para Potência Constante

Neste caso, a descarga do capacitor após o afundamento da tensão de entrada ocorre drenando potência constante (P_C), Figura 1(c). Esse processo se dá porque o conversor tenta compensar o decaimento da tensão, aumentando a corrente suprida à carga para manter a potência constante. O decaimento da tensão torna-se mais rápido. Considerando que o capacitor está com energia inicial ($E_0 = C \cdot V_{max}^2 / 2$), e decaindo na taxa da potência constante ($E(t) = E_0 - P_C \cdot t$) obtemos a equação (3), representada na Figura 2(c):

$$v(t) = \sqrt{V_{max}^2 - \frac{2 \cdot P_C \cdot t}{C}} \quad t > tsag \quad (3)$$

Na Figura 1(c), o bipolo representado como (P_C) é composto de um circuito regulador controlado como, por exemplo, de fontes chaveadas. Importante notar que em fontes chaveadas normalmente não existe o transformador de entrada, e o estágio de retificação é ligado direto à rede e, portanto, exposto aos eventos diretamente.

B. Susceptibilidade a Afundamentos de Tensão

A susceptibilidade de uma dada carga a AMT's de tensão pode ser determinada através de ensaio do equipamento a variações controladas de tensão, resultando curvas semelhantes às mostradas na Figura 3. Essas curvas definem três regiões: *Região de Operação Normal*, *Região de Afundamento Tolerável* e *Região de Desligamento*.

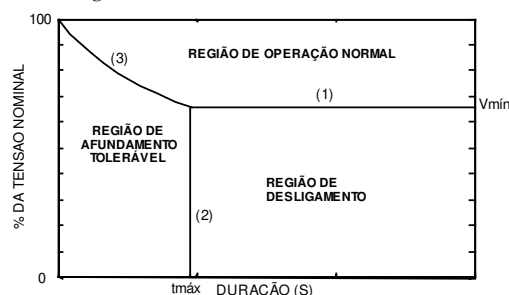


Figura 3 - Curvas de Tolerância a AMT's.

- (1) Limite de Tensão Mínima (V_{min})
- (2) Limite de Duração Máxima Tolerada ($tmáx$)
- (3) Curva de Decaimento da Fonte CA-CC

1. Região de Operação Normal

Por Região de Operação Normal entende-se a região acima do Limite de Tensão Mínima (V_{min}) e da Curva de Decaimento da fonte CA-CC da carga.

A principal característica da Região de Operação Normal é que um evento com perfil de evolução temporal nessa região, não afeta o funcionamento da carga.

2. Região de Afundamento Tolerável

A Região de Afundamento Tolerável é delimitada abaixo da Curva de Decaimento da fonte CA-CC até o Limite de Duração Máxima Tolerada ($tmáx$).

Dentro da Região de Afundamento Tolerável um evento pode ter qualquer perfil de evolução temporal, podendo a tensão até chegar ao nível zero (interrupção), porém com duração máxima igual a $tmáx$. Dentro desses limites a carga sensível não sofre desligamento, sendo a energia suprida pelo capacitor da fonte CC.

3. Região de Desligamento

Finalmente, a Região de Desligamento é delimitada abaixo V_{min} , e com duração maior que $tmáx$. Um evento que adentre esta região causará mau funcionamento da carga com perda parcial de informações e das funções ou o desligamento completo do equipamento com perda total das funções e informações, dependendo da maior ou menor intensidade da violação desses limites.

C. Ensaios de AMT's com Cargas Sensíveis

Para um evento qualquer, com tensão inicial nominal, o que determina se irá ou não ocorrer o desligamento da carga

depende do nível da tensão interna do conversor atinge após $t_{m\acute{a}x}$. Se a tensão da fonte interna após $t_{m\acute{a}x}$ for inferior a $V_{m\acute{i}n}$, irá ocorrer desligamento.

A Figura 4 mostra um AMT, que causa desligamento da carga, uma vez que a tensão CC decai mais que o limite $V_{m\acute{i}n}$ indicado, a partir de $t_{m\acute{a}x}$, assinalado como PD.

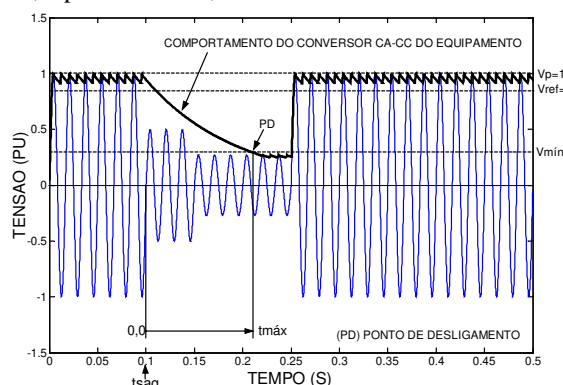


Figura 4 - Afundamento Causando Desligamento

O primeiro patamar do afundamento (0,1s a 0,15s) está na Região de Afundamento Tolerável. O segundo patamar do afundamento de tensão está em duas regiões, na Região de Afundamento Tolerável até PD e a partir daí na Região de Desligamento. Neste caso, a tensão da fonte interna fica abaixo da tensão $V_{m\acute{i}n}$ e, por isso, ocorre o desligamento.

Para confirmar esse comportamento de cargas sensíveis, realizou-se teste de AMT's em um microcomputador (PC), com 64Mbytes de memória, processador Pentium MMX de 200MHz (sem marca). O computador foi testado para uma tensão pré-evento nominal (127V).

A bancada de ensaio foi composta por: uma fonte CA programável de 4,5KVA (Califórnia Instruments, mod. 4500iL), uma plataforma de aquisição de dados A/D de 4 canais de 2400Hz, 0 - 220V, um microcomputador para controle da fonte e do sistema de aquisição.

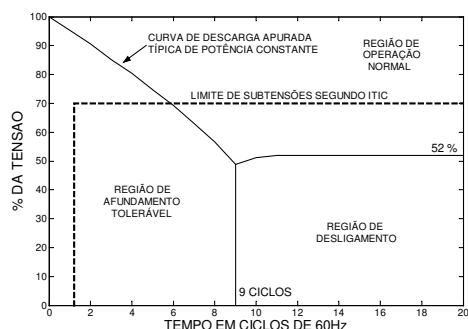


Figura 5 - Curva de Tolerância resultante para o Microcomputador

D. Curva de Tolerância do Computador a AMT's

O microcomputador é suprido através de uma fonte chaveada e, de acordo com os resultados, mostrados na Figura 5, a sua

curva de decaimento tende para Potência Constante. Notar que resultou $V_{m\acute{i}n} = 52\%$ e $t_{m\acute{a}x} = 9$ ciclos.

E. Testes do Computador com AMT de Formas Arbitrárias

Para confirmar que a vulnerabilidade do microcomputador aos AMT's é representada pela Curva de Tolerância obtida (Figura 9), foram programados 4 eventos com características distintas, e mostradas na Figura 10 a seguir.

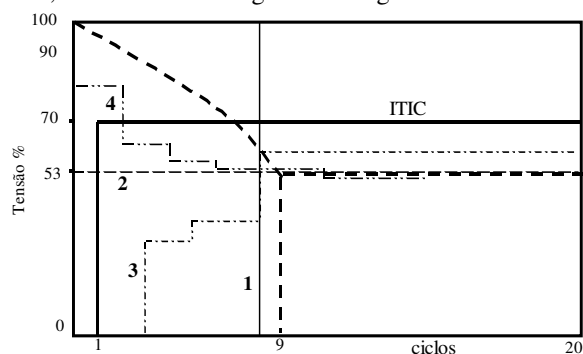


Figura 6 - Afundamentos Programados (1 - 4).

O resultado desses ensaios é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Diagnóstico dos AMT's sobre o microcomputador

AMT	M %	D ciclos	Diagnóstico ITIC	Impacto Real
1	0	8	Viola	Não Desliga
2	53	20	Viola	Não Desliga
3	0	20	Viola	Não Desliga
4	50	20	Viola	Desliga

Pode-se notar pelo ensaio do microcomputador que o diagnóstico segundo a metodologia da Magnitude e Duração é extremamente severo e pouco representativo do impacto real causado sobre a carga.

Além disso, fica confirmado que a Curva de Tolerância representa com fidelidade o real impacto dos AMT's, pois como mostra a Figura 6, apenas no evento 4 ocorre uma pequena invasão da região de desligamento, mas que é suficiente para que o computador entre em colapso.

IV. PARÂMETROS DE CARGA SENSÍVEL FRENTE A ELEVAÇÕES DE TENSÃO

Neste item será investigado como uma carga alimentada por um conversor CA-CC responde a elevações momentâneas de tensão (EMT). Será mostrado que neste caso os parâmetros a considerar são:

Tensão Máxima ($V_{m\acute{a}x}$): maior tensão, em regime permanente, que uma carga suporta sem apresentar mau funcionamento ou sofrer danos irreversíveis.

Tensão de Ruptura (V_{iso}): máxima tensão suportada pela carga, sem que ocorra ruptura de dielétrico ou isolamento de algum componente.

Curva Limite de Tensão de Dano: limite máximo de tensão transitória que a carga suporta sem apresentar mau

funcionamento nem sofrer algum tipo de dano. Essa curva pode ser obtida com aplicação de sobretensões controladas, cuja duração é determinada pelo momento da falha da carga sensível.

A. Curva de Tolerância a Elevações de Tensão

De forma similar à curva de tolerância a AMT's pode-se obter uma curva de tolerância a EMT's. A Figura 7 mostra o aspecto típico dessa curva, onde são indicados os limites (1) $V_{m\acute{a}x}$, (2) *Viso* e (3) *Curva Limite de Dano*.

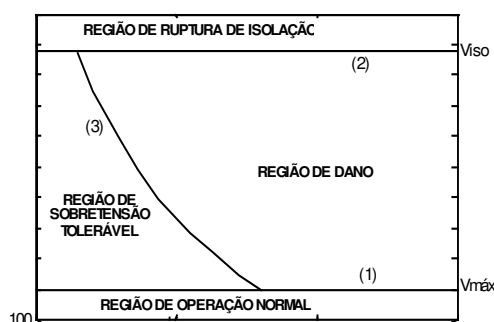


Figura 7 - Curva de Tolerância a Sobretensões

- (1) Limite de Tensão Máxima ($V_{m\acute{a}x}$)
- (2) Limite de Isolação (*Viso*)
- (3) Curva Limite de Dano

Neste caso são definidas 4 regiões, a saber: *Região de Operação Normal*, *Região de Sobretensão Transitória Tolerável*, *Região de Dano* e *Região de Ruptura*.

1. Região de Operação Normal

A Região de Operação Normal é delimitada abaixo de $V_{m\acute{a}x}$. Qualquer elevação de tensão que fique nessa região pode perdurar, em regime permanente, que a carga não deverá apresentar qualquer tipo de falha ou dano.

2. Região de Sobretensão Transitória Tolerável

A Região de Sobretensão Transitória Tolerável é delimitada acima de $V_{m\acute{a}x}$, à esquerda da *Curva Limite de Dano* e abaixo de *Viso*. Um evento de sobretensão nesta região de curta duração, também não deve causar falha ou dano à carga.

3. Região de Dano da Carga Sensível

A Região de Dano da Carga Sensível é delimitada acima de $V_{m\acute{a}x}$, à direita da *Curva Limite de Dano* e abaixo de *Viso*. Um evento de sobretensão nesta região pode até causar a queima do equipamento. Importante notar que eventos que adentrem esta região necessariamente passaram pela Região de Sobretensão Tolerável.

4. Região de Ruptura de Isolação

A Região de Ruptura de Isolação é delimitada acima de *Viso*, e qualquer elevação de tensão nesta região causa danos imediatos por ruptura de isolamento de componentes da carga

sensível.

B. Modelo de Carga para EMT's

Como nos afundamentos de tensão, as elevações de tensão também interagem com os armazenadores de energia dos conversores CA-CC, ou seja, a resposta das cargas sensíveis a sobretensões depende essencialmente das curvas de carga e descarga dos filtros CC dessas fontes.

As curvas de descarga ou de decaimento já foram analisadas anteriormente, mostrando-se as características resultantes quando a fonte alimenta cargas do tipo *Impedância Constante*, *Corrente Constante* e *Potência Constante*. Falta analisar o comportamento da tensão CC desses capacitores frente a EMT's. Trata-se de um processo de carga do capacitor, imposto pelo aumento brusco da tensão da rede.

1. Modelo para Impedância Constante

Tomando como base a Figura 1, temos um conversor CA-CC com quatro estágios: transformador abaixador, retificador, filtros CC e a carga propriamente dita, neste caso, uma impedância constante. Considerando a Figura 1(a), e definindo:

- R_1, R_2 : resistências dos enrolamentos primário e secundário.
- X_1, X_2 : reatâncias de dispersão do primário e secundário.
- a : relação de transformação
- r_D : resistência interna dos diodos
- v_D : tensão de polarização dos diodos

pode-se escrever as equações 4 e 5 como o equivalente do transformador e do estágio de retificação.

$$R_{eq} = \frac{R_1}{a^2} + R_2 + r_D \quad (4) \quad X_{eq} = \frac{X_1}{a^2} + X_2 \quad (5)$$

resultando as equações 6 e 7 para carga do capacitor:

$$R_{eq} \cdot C \frac{dv_c}{dt} = -v_c + R_{eq} \cdot i_T \quad (6)$$

$$L_{eq} \frac{di_T}{dt} = e(t) - v_c - v_D - R_{eq} \cdot i_T \quad (7)$$

A evolução da tensão no capacitor, alimentando um circuito de Impedância Constante, frente a um degrau de tensão, pode ser visto na Figura 8(a).

2. Modelo para Corrente Constante

Neste caso, o modelo é baseado na Figura 1(b), com praticamente os mesmos parâmetros do modelo de Impedância Constante, ou seja: transformador, estágio de retificação, estágio do filtro CC, alimentando carga de Corrente Constante, obtemos as equações 8 e 9:

$$C \frac{dv_c}{dt} = -I_C + i_T \quad (8)$$

$$L_{eq} \frac{di_T}{dt} = e(t) - v_c - v_D - R_{eq} \cdot i_T \quad (9)$$

A evolução da tensão no capacitor, alimentando um circuito

de Corrente Constante, frente a um degrau de tensão, pode ser visto na Figura 8(b).

3. Modelo para Potência Constante

O modelo para Potência Constante é característico de fontes chaveadas. Estas normalmente não apresentam o transformador de entrada, resultando apenas três estágios: retificação, filtro CC e a carga, que neste caso absorve potência constante, Figura 1(c).

Notar que neste modelo Req é representado unicamente pela resistência interna do estágio de retificação (r_D) e não existe a reatância do transformador:

$$Re_q = r_D \quad e \quad Xeq = 0 \rightarrow Leq = 0$$

Pelo modelo da Figura 1(c), obtemos a equação 10 para carga tipo Potência Constante.

$$r_D \cdot C \frac{dv_c}{dt} = e(t) - v_c - v_D - r_D \frac{P_C}{v_c} \quad (10)$$

A evolução da tensão no capacitor, alimentando um circuito de Potência Constante, frente a um degrau de tensão, pode ser visto na Figura 8(c).

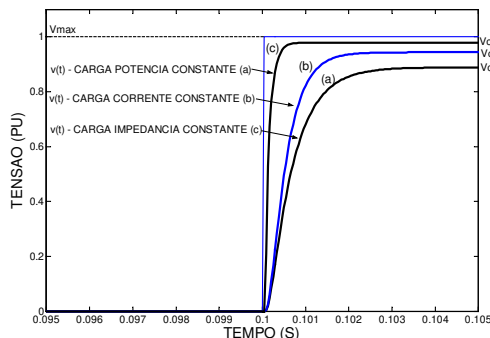


Figura 8 – Resposta ao degrau unitário de EMT com:
(a) Carga tipo Impedância Constante,
(b) Carga tipo Corrente Constante,
(c) Carga tipo Potência Constante

C. Impacto causado por EMT's em Cargas Sensíveis

Conhecendo-se o processo de carregamento e de decaimento da tensão dos armazenadores de energia dos conversores CA-CC que alimentam as cargas sensíveis, pode-se prever, por simulação, o real impacto que um evento de EMT na rede causará sobre essa carga. A Figura 9 ilustra o que acontece frente a um surto de tensão na rede.

Analisando esse evento, nota-se que podem ocorrer dois efeitos danosos a uma carga sensível:

Primeiro, um elevado valor de pico do surto poderia causar ruptura de isolamento ($V_{p_{surto}} > V_{ISO}$). Na Figura 9, o surto teve valor máximo de 40% com duração de apenas 50,0 μs , insuficiente para causar danos.

Segundo, uma sobretensão prolongada é observada na tensão de saída do conversor, imposta pela tensão nos elementos

armazenadores de energia (capacitores). Sua magnitude ($V_{p_{cc}}$) é dada pela resposta de carga dos capacitores e sua duração é determinada pela descarga (t_{elev}). No exemplo da Figura 9, temos uma sobretensão dos capacitores com valor máximo de 26,5% e duração de 87,9 ms (5,3 ciclos de 60 Hz).

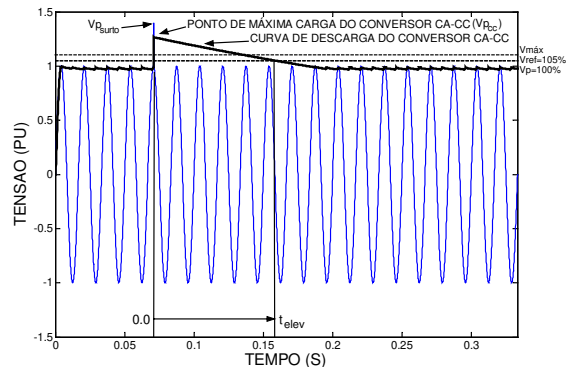


Figura 9 - Sobretensão devido a um Surto de Tensão

O valor máximo de tensão dos capacitores ($V_{p_{cc}}$) não atinge o pico máximo do surto de tensão ($V_{p_{surto}}$) devido à constante de tempo imposta pela impedância de dispersão do transformador de entrada, que limita a carga dos capacitores do filtro CC.

A Figura 10, mostra uma sobretensão de rede de 30% durante 4 ciclos. Neste caso a carga consegue acompanhar o aumento da tensão da rede, de modo que a tensão máxima dos capacitores ($V_{p_{cc}}$) é o valor de pico da senoide (V_p).

Importante assinalar que também neste caso ocorre um prolongamento da duração da sobretensão, além do evento na rede. No caso da Figura 10 temos uma sobretensão de 30% e duração de 171,3 ms (10,3 ciclos de 60Hz), bem mais do que os 4 ciclos do evento na rede.

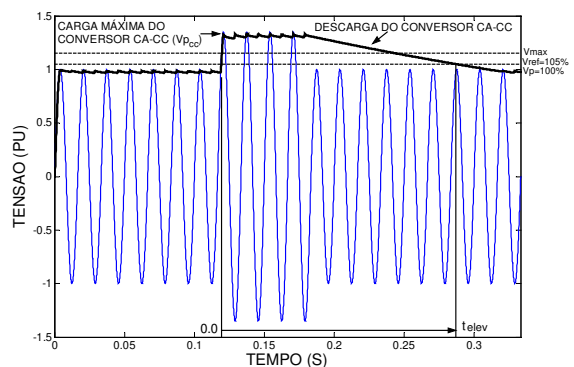


Figura 10 - Sobretensão Retangular de Quatro Ciclos

Pela metodologia M&D, o evento da Figura 9 (Magnitude 40% e Duração 50 μs), seria considerado um transitório de tensão, sendo que na realidade temos uma VTCD, pois a duração da sobretensão foi de 87,9 ms (5,3 ciclos).

V. ENSAIOS DE EMT'S COM CARGAS SENSÍVEIS

Para confirmar o comportamento de cargas sensíveis frente a

EMT's, realizou-se testes em dois conversores CA-CC, um regulador simples de tensão, com topologia mais básica possível (transistor de potência, zener e um resistor para polarização) e uma fonte chaveada de computador (marca: Delta Electronics).

Para os testes de EMT's utilizou-se a mesma estrutura usada para os testes de AMT's, com o acréscimo de um osciloscópio Tektronix TDS 340A com floppy disk para captura de imagens.

A. Regulador de Tensão Simples

A Figura 11, mostra um surto de tensão de entrada com aproximadamente 89% do pico da tensão. Como resposta o capacitor apresentou uma sobretensão máxima de 32,7% e duração de aproximadamente 29ms (1,74 ciclos de 60Hz).

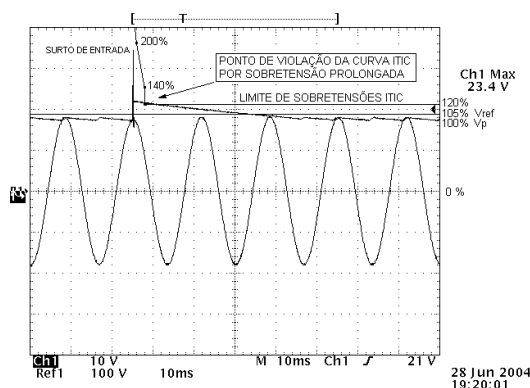


Figura 11 - Surto de Tensão Aplicado a um Regulador Simples

Notar que a tensão da fonte regulada não acompanha o valor de pico da tensão de surto, como já previsto, devido ao bloqueio do transformador de entrada.

Também é possível observar a sobretensão prolongada, devido ao lento decaimento da tensão do capacitor que alimenta a carga. Com isso ocorreu, uma leve violação da curva ITIC, também mostrada na Figura 11.

B. Fonte Chaveada de um Microcomputador

Na Figura 12, aplicou-se um surto de tensão de 45% da tensão de pico, a uma fonte chaveada alimentando um microcomputador. Neste caso, como não há transformador de entrada, a resposta da tensão da fonte chaveada é muito rápida, e a sobretensão no capacitor de saída praticamente acompanha o pico do surto.

O impacto real do surto de tensão sobre a carga sensível, segundo a Figura 12, foi de 45% e a duração da sobretensão foi de aproximadamente 220ms (13,2 ciclos de 60Hz). Pode-se perceber uma região em que ocorre significativa violação dos limites de sobretensão da curva ITIC devido à sobretensão prolongada pela lenta descarga do capacitor da fonte chaveada.

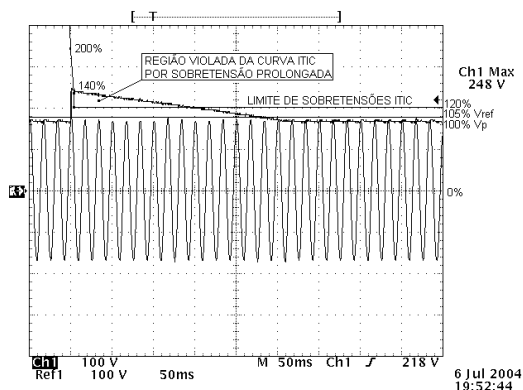


Figura 12 - Surto de Tensão Aplicado a uma Fonte Chaveada (PC)

VI. CONCLUSÕES

As principais conclusões desse trabalho são:

- 1) Quando se trata de cargas sensíveis a VTCD's, é necessário levar em conta o real impacto que o evento na rede impõe às fontes que alimentam essas cargas.
- 2) A tolerância das cargas a VTCD's pode ser determinada através de ensaios e usada para avaliar o real impacto de um determinado evento sobre essas cargas.
- 3) O método da Magnitude e Duração do Evento, aplicado às curvas CBEMA/ITIC, não expressa o real impacto sobre as cargas.
- 4) Cargas sensíveis, como as que foram analisadas, respondem ao valor de pico da tensão da rede, e não ao valor eficaz, como habitualmente tem sido utilizado.

AGRADECIMENTOS

Ernesto K. Luna conta com bolsa de Mestrado Capes para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. H. J. Bollen, "Voltage Sags in Three-Phase Systems", IEEE - Power Engineering Review n. 9, Sept. 2001.
- [2] M. McGranaghan, B. Roettger, "Economic Evaluation of Power Quality", IEEE - Power Engineering Review n. 2, Feb. 2002.
- [3] ITIC (CBEMA) Curve Application Note, "Technical Committee 3 (TC3) of the information Technology Industry Council". www.itic.org/technical/iticurv.pdf.
- [4] G. T. Heydt, R. Ayyanar, R. Thallan "Power Acceptability", IEEE - Power Engineering Review n. 9, Sept. 2001.